



移动扫码阅读

王旭, 罗振兴, 夏志鹏, 等. 工业有机固废气化技术的研究进展[J]. 能源环境保护, 2024, 38(5): 92-103.
WANG Xu, LUO Zhenxing, XIA Zhipeng, et al. Research progress of industrial organic solid waste gasification technology[J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(5): 92-103.

工业有机固废气化技术的研究进展

王旭, 罗振兴, 夏志鹏, 郭倩倩, 胡艳军*

(浙江工业大学 能源与碳中和科教融合学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 气化是解决工业有机固废高效清洁处置利用的重要技术, 近年来被广泛使用, 尤其在污染物减排和能源化再利用方面发挥着积极作用。通过维持还原性气氛实现气化反应, 可将工业有机固废中的有机组分转化为高热值合成气。实施工业有机固废资源再生利用可以缓解对传统能源和化工原料的需求, 有利于实现循环经济和可持续发展。从气化过程的影响因素、协同反应机制、产物预测等方面入手, 着重综述了工艺参数、气化炉类型等对工业有机固废气化过程的影响规律, 阐述了多元物料组分共气化过程中的协同作用机理。最后, 梳理了近年来工业有机固废气化领域的研究重点, 并提出了未来的研究方向, 包括借助现代原位表征技术构建完整的协同反应路径, 结合密度泛函理论解析共气化过程中的多反应耦合作用机制, 利用机器学习优化工业有机固废气化的工艺参数, 以及开展工业有机固废共气化的生命周期评价等。

关键词: 工业有机固废; 气化; 影响因素; 机器学习; 循环经济

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2024)05-0092-12

Research progress of industrial organic solid waste gasification technology

WANG Xu, LUO Zhenxing, XIA Zhipeng, GUO Qianqian, HU Yanjun*

(Institute of Energy and Carbon Neutrality Integration of Science and Education,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Gasification is an important technology for efficiently and cleanly disposing of and utilizing industrial organic solid wastes. It has been widely used in recent years and plays an active role, particularly in reducing pollutants and reusing energy. The gasification reaction is achieved by maintaining a reducing atmosphere, which converts organic components into high-calorific-value syngas. By implementing this method of utilizing industrial organic solid waste resources, we can reduce the demand for traditional energy and chemical raw materials, as well as the exploitation of natural resources. This contributes to the achievement of a circular economy and sustainable development. We begin this paper by discussing the influencing factors of gasification process, synergistic reaction mechanisms, and product prediction. It focuses on reviewing the process parameters, gasifier types, and other factors that influence the gasification process. Additionally, it describes the synergistic mechanism in the co-gasification of mixed materials. Finally, we have sorted out the focuses in the field of industrial organic solid waste gasification in recent years and proposed future research directions, which include constructing a complete synergistic reaction pathway with the help of modern in-situ characterization techniques, analyzing the mechanism of multi-reaction coupling in the process of co-gasification by combining density functional theory calculations and theoretical modelling, optimizing the process parameters of the

收稿日期: 2024-05-20

修回日期: 2024-07-25

DOI: 10.20078/j.eep.20240803

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作资助项目(2024YFE0100200); 龙游县 2023 年重大科技攻关课题“揭榜挂帅”资助项目(JHXM2023082)

作者简介: 王旭(1996—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要研究方向为有机固废气化制备绿色燃料。E-mail: wangxu021215@163.com

通讯作者: 胡艳军(1979—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 主要研究方向为有机固废清洁能源化利用。E-mail: huyanjun@zjut.edu.cn

industrial organic solid waste gasification by using machine learning, and conducting life cycle analysis of the co-gasification of industrial organic solid waste.

Keywords: Industrial organic solid waste; Gasification; Influencing factors; Machine learning; Circular economy

0 引 言

工业有机固废气化是一种将工业生产中各类有机固废转化为可再生能源的有效技术^[1]。随着工业化进程的不断推进,工业有机固废的产生量不断增加,包括各类工业污泥、食品加工厂残渣、皮革废物、废塑料、废橡胶、中药残渣等。预计到2025年,中国工业污泥产量将达到9 000万t左右^[2]。传统的焚烧、填埋、贮存等处理方式往往存在着利用效率低、污染物排放量高、资源浪费等问题^[3-4]。相比之下,气化技术能够将工业有机固废转化为合成气或液体燃料等清洁能源,并且在此过程中能够实现资源的有效利用,减少环境污染^[5]。因此,工业有机固废气化技术备受关注,成为固废处理和保障能源安全的重要途径。

气化是一种热化学转化反应,可以在较高的温度和低氧水平下将含碳有机固废转化为合成气、液体燃料和灰渣,进而实现资源化利用^[6]。气化合成气主要由 H_2 、 CO 和 CO_2 等组成,可以作为化工领域的合成原料使用,如生产生物甲烷、生物甲醇等^[7-8]。干燥、热解、氧化和还原是气化过程

中的主要步骤(图1),在气化过程中,会发生多种化学反应,而且操作条件(如原料种类^[9]、气化器类型^[10]、温度、压力以及气化剂)会显著影响整体转化率。这些参数对气化反应过程的影响将在后续章节中讨论。由于工业有机固废来源广泛、成分复杂、均一化程度差,为气化过程带来许多挑战。工业污泥的高含水量和低热值等特性导致气化效率较低,能源消耗较高^[11]。废橡塑等热固性塑料的难破碎特性会导致进料堵塞等问题^[12]。不同种类工业有机固废协同气化是避免出现气化过程中各类问题的可行方法。许多研究人员已经研究了利用工业有机固废的共气化生产高品质燃料的方法^[6, 13-14]。另外,工业有机固废在与其他碳基燃料(如煤、生物质等)共气化时不仅可减少煤炭资源的利用,还能减少 CO_2 的排放,实现资源的综合利用。这些结果证明共气化可以在解决工业有机固废处理问题和减少温室气体排放的同时,提高处置效率和产物品质。由此可见,工业有机固废气化的能效一方面取决于原料种类、气化的工艺参数以及反应器的类型,另一方面也取决于添加其他碳基燃料而产生的协同作用。

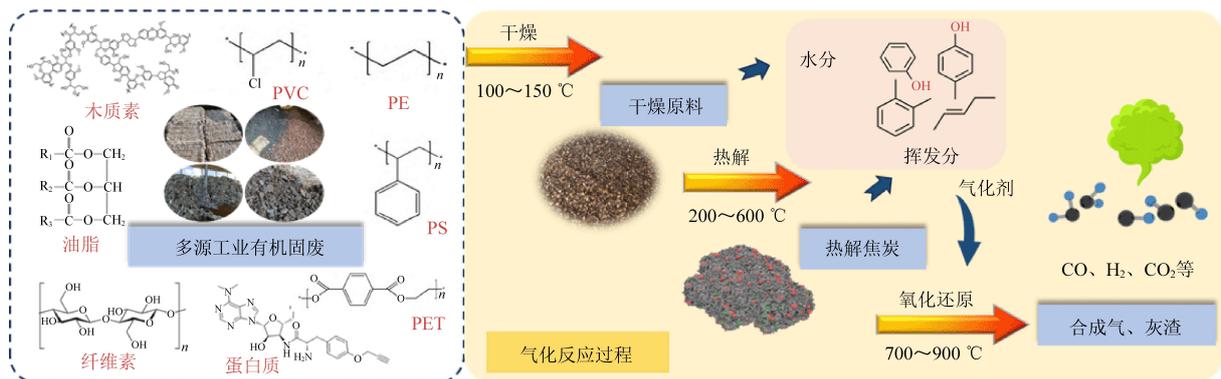


图1 工业有机固废气化反应过程

Fig. 1 Industrial organic solid waste gasification reaction process

基于此,本综述旨在对近年来工业有机固废气化技术的研究进展进行系统总结和分析,包括气化工艺、气化产物特性、反应机理、共气化反应特性和产物预测等方面的最新研究成果。总结和展望了当前研究工业有机固废气化的最新方法和方向。通过对现有研究的梳理,旨在为工业有机固废气化技术的进一步发展提供参考和借鉴,推

动该领域的持续创新和进步。

1 工业有机固废气化特性的影响因素

1.1 温度对气化反应的影响

温度是影响气化反应的关键参数,影响气化合成气的组成和热值。较高的气化温度对促进焦油分解、气化反应,提高产气量都有较大的帮助。

高东亮等^[15]研究了造纸废渣的水蒸气气化,发现高温气化可以加快物料反应速率,900℃时合成气中 H_2 产率达到了24%,相较于700℃提高了16.5%左右,还发现更高的温度对于提高气体产量较为有利。陈志文等^[16]研究汽车拆解废弃物的空气气化特性时发现,随着气化温度升高,气化反应速率加快,合成气中 H_2 、 CH_4 、 CO 等产率都有所增加,而 CO_2 产率降低,且气化效率和碳转化率均随着气化温度的升高而提高。GONG等^[17]在研究纺织废水污泥的超临界水气化制氢时发现,提高气化温度有利于提升 H_2 和 CH_4 的产率,随着温度的升高, H_2 摩尔分数从16.5%缓慢增加到29.4%,同时 CH_4 的含量也从4.4%增加到25.8%, CO_2 含量则从73.6%迅速下降到30.5%。MOLES等^[18]进行了污泥吸附强化气化的中试研究,结果表明当气化温度从640℃升高到685℃时,总气产率分别从0.32 Nm^3/kg 增加到0.49 Nm^3/kg ,固定碳转化率从约30%增加到56%。

综上所述,温度是工业有机固废气化反应中的关键因素之一,对反应速率、产物分布、产物品质和气化效率都有重要影响。因此,在设计和优化气化工艺时,需要充分考虑温度对气化反应的影响,并选择合适的温度条件以实现预期的气化效果。

1.2 气化剂对气化反应的影响

气化剂在工业有机固废气化过程中扮演着至关重要的角色,其种类、组成和比例对气化反应的进行和产物分布具有重要影响。常用的气化剂包括空气、水蒸气、 CO_2 及氧气等。考虑成本效益,空气通常是气化工业有机固废主要采用的气化剂。

一般通过改变 O/C 或 ER (空气当量比)研究气化剂用量对气化过程的影响。DANG等^[19]在气化含铝塑料包装时发现,随着 ER 从0.2增加到0.6,合成气的产率从58.80%增加到61.72%,然后急剧下降到53.80%,而焦的产率从0.79%增加到1.60%。ERDOGAN等^[20]在模拟等离子气化处理医疗废物的数据中发现,随着 ER 的增加, H_2 的体积分数增加, CO 和 H_2S 的百分比减少。在 ER 分别为1.1、0.1、0.3和0.4的条件下,产合成气的体积流量分别为18.7、17.0、18.5和23.8 Nm^3/h ,同时在 $ER=0.4$ 时,冷煤气效率(CGE)最高,合成气产量最大。JANČAUSKAS等^[21]在研究上升气流床中空气气化塑料包装混合物等固废时发现,将 ER 从0.21降低到0.15,合成气的热值增加,此时塑料包装混合物中 H_2 含量可达11.39%,同时固废

垃圾燃料棒(SRF)产气中焦油含量最高可达47.44 g/m^3 ,主要由苯、甲苯、萘等组成。

气化剂种类、组成及比例也会显著影响工业有机固废气化的产物分布和气化特性。HU等^[22]研究发现,与仅含有 CO_2 或水蒸气的气化剂相比,在 H_2O/CO_2 比为9%~90%时,水蒸气和 CO_2 可以通过竞争和协同作用共同产生 H_2 ,合成气的产率提高了0.6%~11.2%,其中 H_2 的最大浓度达到63.73%,高位热值(HHV)为10.51 MJ/Nm^3 。MA等^[23]研究了4种有机固废在 CO_2 气氛下的气化特性,发现低于分界温度时,4种有机固废的气化热重曲线(DTG)都向低温区轻微偏移,最大失重速率减小,这说明 CO_2 气氛对气化阶段的初始热解过程有一定的影响。

因此,气化剂也是工业有机固废气化反应中的关键影响因素之一,对产物分布、产物品质和气化效率有重要影响。在设计和优化工业有机固废气化工艺时,需要充分考虑气化剂种类、组成比例对气化反应的影响,并选择合适的气化剂条件以实现气化反应高效进行和产物组成选择性优化。

1.3 压力对气化反应的影响

气化压力对气化反应的速率、产物分布和设备的性能有着重要影响。常压或加压状态是2种常见的工业有机固废气化反应条件,压力也会影响合成气的成分,较高的压力有利于 H_2 和 CH_4 的生成,但不利于 CO 的生成^[24]。

ŚPIEWAK等^[25]研究了压力对废轮胎水蒸气气化的影响,结果发现在温度为800℃,压力为1 MPa时 H_2 的产率较高,随着温度的升高,高压带来的促进作用越来越弱。此外,研究还发现压力对动力学参数存在显著影响。在非催化和催化测试中,增加压力使活化能(E_a)和指前因子(A)增加, A 的显著增加补偿了较高的活化能,从而引起压力对反应性的正影响。郭鹏等^[26]研究污泥与生物质共气化时发现,随着气化压力的增加,气体合成气中 H_2 含量从28.18%降低到22.83%, CO 含量从15.25%降低12.22%,而 CO_2 含量从11.28%增加至13.05%, CH_4 含量0.22%增加至2.91%,且 CGE 、合成气浓度和 CO 选择性都明显降低。

综上所述,气化压力对工业有机固废气化的反应速率、产物分布、设备性能和热力学性质都具有重要影响。因此,在气化过程中需要充分考虑气化压力的选择和调节,以实现气化反应的高效进行和产物质量的选择性优化。

1.4 停留时间对气化反应的影响

燃料颗粒在气化反应器内的平均时间称为停留时间。在工业有机固废的气化过程中,停留时间是一个关键的操作参数,直接影响气化反应的效率和产物的分布。

一般来说,循环流化床(CFB)的停留时间较短,而鼓泡流化床(BFB)的停留时间较长。对于气流床气化炉,HASHEMISOHI等^[27]研究发现在气化温度保持不变的情况下,增加停留时间可以减少焦油、CO₂和CH₄的生成。LI等^[28]研究了不同温度和停留时间对含油污泥超临界水气化(SCWG)影响,发现H₂产率随温度升高和停留时间延长而提高,甲烷产率和碳转化效率(CCE)在600℃时达到最大值。此外,LI等^[29]的研究还揭示了不同形态重金属在SCWG过程中的转化趋势,并提出了Zn在超临界流体中转化的反应途径和定量动力学模型。这些研究表明,通过优化反应停留时间,不仅可以提高气化效率,还可以实现气化灰渣中重金属的有效稳定化。因此,停留时间的控制对于气化炉的设计和运行至关重要,它直接关系到气化反应的效率和产物的质量。

综上所述,较短的停留时间可能导致反应不完全,从而影响产物的产率和质量;较长的停留时间可能增加设备的投资和运行成本。因此,确定最佳的停留时间对于提高气化反应的效率和经济效益至关重要。此外,停留时间的优化还需要考虑原料的性质、反应器的设计和操作条件等因素。未来的研究可以进一步探索停留时间与气化反应之间的关系,以及如何通过先进的控制策略来优化停留时间,以实现工业有机固废的有效处理和资源化利用。

1.5 气化反应器类型对气化反应的影响

气化反应器的类型对于工业有机固废气化过程的效率和产物分布具有决定性的影响。不同的气化反应器,如固定床、流化床和气流床等,会影响反应条件,进而影响气化反应的动力学和热力学特性。选择合适的气化反应器类型对于实现高效、低成本和环保的气化过程至关重要。

固定床和流化床气化反应器因其独特的操作特性和广泛的适用性受到研究者的青睐。固定床气化炉,根据原料与气化剂的流动方向,分为上吸式和下吸式2种设计。上吸式固定床气化炉中,原料与气化剂逆向流动,原料在向下流动过程中被向上的高温气体加热,发生裂解,生成的气体经

过气化剂的燃烧区,最终从气体出口排出(图2)。这种设计产生的合成气杂质较少,但产率较低,且焦油含量较高。相对而言,下吸式固定床气化炉中原料与气化剂同向流动,能够在氧化层中发生更为有效的气化反应,生成高品质、低焦油含量的合成气,并实现较高的碳转化率。

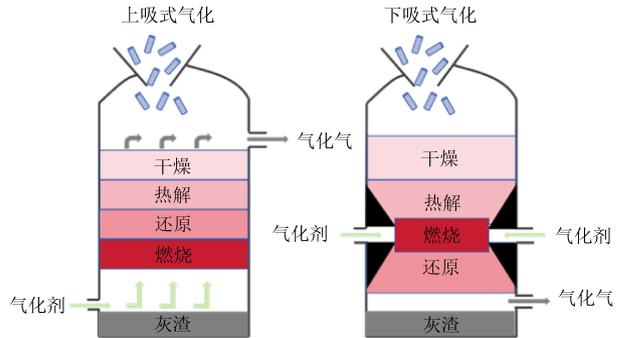


图2 上吸式、下吸式固定床气化炉原理

Fig. 2 Principles of updraft and downdraft fixed-bed gasifiers

QUAN等^[30]使用上吸式气化炉,并利用空气作为气化剂,研究了污泥和生物质混合物的气化过程,产生了低位热值(LHV)为3.5~6.0 MJ/Nm³的合成气。TEZER等^[31]的研究进一步揭示了固定床气化炉在不同操作条件下的性能,指出在900℃时,上吸式和下吸式固定床气化炉的H₂含量分别可达42%和46%。此外,TEZER等^[31]还研究了不同固定床气化炉系统对橄榄渣的气化潜力,以干燥空气为气化剂,在上升气流和下降气流气化炉中分别获得H₂含量为48%和45%的热值约为12.4 MJ/Nm³的合成气。

流化床气化炉则以其卓越的传热效率和产气率在大规模生物质能利用中展现出显著优势。这种反应器利用高速气流通过砂床能够提供良好的混合作用,实现了气固之间更有效的接触和传热。流化床气化过程中,焦油的裂解导致合成气中焦油含量相对于固定床气化低,使其在煤炭发电等领域得到了广泛应用。然而,这种反应器对原料粒度有较高要求,且设备复杂度,成本相对较高。

CHEN等^[32]的研究专注于流化床共气化处理方法,通过Taguchi法确定了最佳运行参数,实现了最大H₂产率(28.64%)和最佳H₂/CO比(1.34)。LI等^[33]的研究则展示了碱催化剂在含油污泥超临界气化过程中的积极作用,通过优化工艺条件,实现了高达95.87%的碳气化效率。LIU等^[34]在流化床中进行了垃圾衍生燃料的气化实验,研究了温度、氧浓度、蒸气/RDF比(S/R)、

ER和催化重整对合成气质量的影响。结果表明,在850℃时合成气的气化效率和低热值最高,当ER=0.23时气化过程效率最高。富氧气化显著提高了合成气质量,气化剂氧浓度从21%增至40%时,合成气低热值增加了112%,H₂增加了76.4%。CHEN等^[35]研究了污水污泥在流化床反应器中的超临界水气化。在480℃时,污水污泥中的有机物在水中完全溶解水解,随着温度的升高,它们进一步反应形成气体产物和其他产物。当温度从480℃升高到540℃时,总气收率从0.39%增加到0.51%,总液收率从99.19%下降到99.05%。温度升高导致溶液和水解产物发生脱氢和聚合反应,这可以用Diels-Alder反应机理来解释。

此外,还有部分研究人员使用不同规模的流化床气化进行实验。NAM等^[36]采用实验室规模的1 kg/h气泡流化床气化炉,研究了一次性新型冠状病毒口罩的CO₂气化和焦油去除特性。合成气成分为10.52%的H₂,6.18%的CO,12.05%的CH₄和14.44%的碳氢化合物(C₂~C₃)。结果表明,活性炭气化CO₂的焦油还原效率为49%,碳转化效率为45.16%,冷气效率为88.92%。PARRILLO

等^[37]采用一个中试规模的鼓泡流化床气化炉进行共气化试验,该气化炉足够大,可以排除任何放大效应,并且能够处理高达100 kg/h的废塑料和生物质混合物。结果表明,塑料/生物质比和ER显著影响气化炉的性能,尽管得到了较多的合成气,但品质不高,合成气的热值在7~10 MJ/m³。

因此,不同的气化反应器设计在反应速率、产物选择性、设备规模和操作灵活性等方面表现出不同的特点。固定床反应器结构简单,适用于小规模生产,但可能存在传热和传质限制;流化床反应器提供较好的传热和传质性能,适用于大规模生产,但需要精细的操作控制;气流床反应器则可以实现高速反应和高产量,但设备复杂,成本较高。因此,选择最佳的气化反应器类型需要综合考虑原料特性、产品需求、经济性和操作便利性等因素。未来研究的方向应聚焦于优化反应器设计,提高气化效率,降低成本,并解决焦油等副产品的处理问题,以推动工业有机固废气化技术的进步和工业应用。表1总结了关于工业有机固废气化的研究,并反映了不同工业有机固废种类和工艺条件对气化反应特性的影响。

表1 工业有机固废气化反应特性

Table 1 Characteristics of gasification reaction of industrial organic solid waste

工业有机固废种类	反应器	气化条件	部分产物特性	参考文献
废旧纺织品	下吸式固定床	温度: 700~800℃ 气化剂: 空气	H ₂ : 15.7%, CO: 17.2%, 碳转化率: 48.0%, 产气率: 1.58 g/Nm ³	[38]
含油工业污泥	流化床	温度: 823℃ 气化剂: 空气	H ₂ : 10.8%, CO: 9.9%, 碳转化率: 48.0%	[29]
汽车拆解物	固定床	温度: 900℃ 气化剂: 空气	H ₂ : 2.8%, CO: 8.6%, 碳转化率: 91.2%	[16]
橄榄渣	固定床	温度: 900℃ 气化剂: 空气	H ₂ : 53.0%, CO: 14.0%, LHV: 12.00 MJ/Nm ³	[32]
城市垃圾	固定床	温度: 800℃ 气化剂: 水蒸气	H ₂ : 34.6%, CO: 27.1%, 产气率: 1.26 g/Nm ³	[39]
卫生产品固体回收燃料	流化床	温度: 700℃ 气化剂: 空气	碳转化率: 98.0%	[40]
橡胶(废轮胎)	流化床	温度: 700℃ 气化剂: 空气	H ₂ : 48.8%, CO: 6.2%, LHV: 15.21 MJ/Nm ³	[41]
塑料混合物	流化床	温度: 894℃ 气化剂: 空气	H ₂ : 8.6%, CO: 5.3%	[42]
污水污泥	流化床	温度: 540℃ 气化剂: 水蒸气	总产气率(质量分数): 0.5% 总产液率(质量分数): 99.1%	[43]

2 工业有机固废共气化技术

由于工业有机固废来源广泛、成分复杂,使用气化技术进行处置时会带来许多挑战。比如工业污泥的高含水量和低热值等特性导致气化效率较低,能源消耗较高、废橡塑等高聚合物导致进料堵塞、不同原料反应时空不均匀等问题。研究发现将多种多源工业有机固废或与其他有机固废进行共气化是一种有效的技术,可以较好地解决单种原料气过程中的各种难题。工业有机固废和生物质的共气化可以减少填埋场甲烷和有害含氮化合物的排放。许多研究都表明污泥与其他固废的共气化是一种无害、低成本和环境友好的方法。

2.1 多源工业有机固废的共气化

研究人员已经开展了多种工业有机废物组合的共气化研究,包括不同废橡塑、工业污泥以及工业污泥与工业有机固废的共气化。通过改变工业有机固废的种类和配比得到各种不同的混合原料,共气化后的产物也大不相同。

LI 等^[44]以聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)废塑料为研究对象,采用 CO₂作为气化剂,在固定床反应器中进行共热解和 CO₂辅助共气化实验。结果表明,共处理过程中 PP 和 PS 的脱挥发作用得到增强, H₂和碳氢化合物产率增加,这主要是由于 2 种塑料的自由基相互作用增强了热裂解和脱氢过程,同时焦油裂解重整反应和 CO₂重整反应的协同增强也显著提升了气化效率和产物质量。DAI 等^[45]研究了富钙和富铁工业污泥的共气化,并探索了气化灰渣在生物质热解挥发物的非原位催化中的潜在应用。结果发现,共气化过程中的相互

作用和灰分催化作用导致提前出现气化产物的峰值。同时,反应温度和掺混比对共气化后残渣的孔隙结构和灰分粒度也有显著影响。富钙和富铁工业污泥的灰分催化作用加速了气化反应,显著提高了气化产物的产量和质量,同时优化了残渣的孔隙结构和灰分粒度。LO 等^[46]验证了富钙造纸污泥与高含氯汽车破碎残渣共气化的可行性,发现共气化合成气体的组成和热值易受到汽车破碎残渣添加比例的影响,富钙造纸污泥在共气化过程中有效抑制了氯化氢和二噁英的排放,显著提高了能量转换效率和气化炉的运行稳定性。

通过这些研究可以看出,共气化过程中,原料间的相互作用和协同效应是提高气化效率的关键。例如,不同废塑料在共气化过程中自由基的相互作用增强了热裂解和脱氢过程,而富钙和富铁工业污泥的灰分催化作用加速了气化反应。这些协同作用机制显著提高了气化效率和产物的质量。通过选择合适的工业有机固废组合和共气化条件,可以有效提高气化效率,增强废物的能源回收潜力,并减少环境污染。

2.2 工业有机固废与生物质的共气化

近年来,工业有机固废与生物质的共气化特性受到了广泛关注。在探索工业有机固废与生物质共气化的过程中,研究者们发现了原料成分间的互补性,这为提高工业有机固废的气化效率和产物选择性提供了新的思路。表 2 总结了关于工业有机固废与其他来源有机固废共气化的研究,并统计了原料混合物类型、工艺条件(包括温度、气化剂)对气体产率、气体成分和碳转化率等产物特性的影响。

表 2 工业有机固废与生物质共气化反应特性

Table 2 Characteristics of co-gasification reaction of industrial organic solid waste with biomass

原料组合	反应器	气化条件	产物特性	参考文献
废旧纺织品与木屑	下吸式固定床	温度: 700~800 °C 气化剂: 空气	H ₂ : 15.7%, CO: 17.2%, 碳转化率: 48.0%, 产气率: 1.58 g/Nm ³	[37]
松木颗粒与 PET 和 HDPE	固定床	温度: 800 °C 气化剂: CO ₂	对 PET 来说, CO 含量减少; 对 HDPE 来说, H ₂ 和 CO 含量增加	[51]
鸡粪和食物残渣	固定床	温度: 800~900 °C 气化剂: 空气	LHV: 5.23 MJ/Nm ³ , H ₂ : 约 18.0%, CO: 20.0%, CO ₂ : 约 10.0%, CH ₄ : 约 5.0%	[52]
木材和食物残渣	固定床	温度: 800~1 000 °C 气化剂: 空气	LHV: 5.29 MJ/m ³ , H ₂ : 18.5%, CO: 22.1%, CO ₂ : 13.6%	[53]
电子设备废物与橄榄渣	下吸式固定床	温度: 800 °C 气化剂: 空气	LHV: 5.00 MJ/Nm ³ , CO ₂ : 9.8%, H ₂ : 12.7%, CO: 17.7%	[54]

续表

原料组合	反应器	气化条件	产物特性	参考文献
废塑料和松木木屑	固定窗	温度: 800 °C 气化剂: 空气	H ₂ : 10.8%, CO: 42.0%, CO ₂ : 37.5%, 焦油产率: 54.8%	[55]
造纸厂废弃物和木屑	下吸式固定窗	温度: 1 000 °C 气化剂: 空气	H ₂ : 16.2%, CO: 23.3%, CO ₂ : 12.7%, LHV: 7.30 MJ/Nm ³	[56]
生物质(松木)与造纸污泥	固定床	温度: 850 °C 气化剂: 空气	H ₂ : 36.0%, CO: 30.5%, CO ₂ : 5.3%, LHV: 7.76 MJ/Nm ³	[57]
以赤铁矿为氧载体的 污水污泥和烟煤	流化床	温度: 900 °C 气化剂: 空气	H ₂ : 47.8%, 产率: 0.85 Nm ³ /kg	[58]
烟煤和工业污泥	固定床	温度: 800 °C 气化剂: 空气	H ₂ : 19.1%, CO: 23.8%, CO ₂ : 10.9%, LHV: 6.17 MJ/Nm ³	[59]

PANG 等^[47]对聚乙烯与纤维素的共气化进行了深入研究,揭示了聚乙烯在共气化过程中可以作为氢供体,从而提高 H₂ 的产量;纤维素的存在又促进了 CO 的产生,并通过降低聚乙烯初始分解温度和延迟后期分解,显著提高了气体产物的热值和碳转化率。HANNL 等^[48]的研究关注了污水污泥与农业残留物共气化过程中成灰元素的命运,污水污泥与农业残留物共气化过程中,大部分磷被保留在床渣馏分中,为磷的回收提供了可能,优化了资源利用。YANG 等^[49]研究了废轮胎与松木屑共气化的特性,发现两者共气化能够显著改善其共气化性能,尤其是在废轮胎添加比为 50% 时, E_a 最低, A 最高。SMOLIŃSKI 等^[50]探索了污水污泥与生物质废弃物或能源作物共气化制富氢系统,证实了共气化在平衡和改善各种进料性能方面的优势。

这些研究表明,通过选择和调整多源工业有机固废与生物质的原料组合,共气化技术在能源回收和环境保护方面具有巨大的应用潜力。原料间的互补性和协同效应显著提高了气化效率和产物质量。例如,在聚乙烯与纤维素共气化时,可以观察到聚乙烯的氢供体生成机制和纤维素中 CO 生成的促进机制;此外,湿污泥的水分在气化初期的扩散过程也有助于实现该效果。

2.3 工业有机固废共气化的数值模拟研究

部分学者采用仿真模拟技术,对工业有机固体废物的共气化进行了深入研究。ERDEM 等^[60]以棉花壳和高密度聚乙烯为原料,通过流化床共气化技术,利用不同的气化剂(水蒸气、空气和二氧化碳)制取氢气,为此构建了新的 Aspen Plus 模型以模拟该过程。研究特别关注了水蒸气共气化中多个关键参数的影响,包括原料中塑料的含量、反应温度、蒸气与原料的比例(S/F)以及在水蒸

气气氛中引入空气和 CO₂ 效果。通过综合分析,研究发现提高塑料含量和 S/F 比可以增加合成气中氢气的浓度,而在 900 °C 的反应温度下,合成气中氢气的产量达到最大值,为 1 189.3 Nm³/t。此外,与单独使用水蒸气作为气化剂相比,同时使用空气或 CO₂ 会降低共气化系统在氢气产率方面的性能。在另一项研究中, YIN 等^[61]利用 Aspen Plus 模型对城市污泥/工业污泥与厨余垃圾的等离子共气化过程及其产氢性能进行了详细分析。研究发现,随着等离子体共气化温度的升高和气化固体燃料比(SFR)的增加,合成气中 H₂ 和 CO 的摩尔分数略有下降。2 500 °C 的共气化温度下,城市污泥与厨余垃圾共气化产生的合成气中, H₂ 和 CO 的含量分别为 50.14% 和 34.15%。相比之下,城市污泥与食物垃圾共气化后,合成气中 H₂ 和 CO 的摩尔分数分别为 45.62% 和 37.00%。由于原料组成的差异,城市污泥与厨余垃圾的共气化在制氢能力和能源升级利用方面表现出更好的性能。该工艺的产氢量达到 48.08 MW,比工业污泥与厨余垃圾共气化工艺的产氢量高 57.43%。

总之,工业有机固废与生物质共气化过程中的协同作用机理主要体现在热解和气化阶段的协同效应、自由基和中间产物的互相促进、碳质和矿物质的互补效应、灰分和碱金属的协同作用、气体产物的相互促进等方面。这些协同作用可以提高气化效率,优化气体产物组成,减少环境影响,为实现工业有机固废与生物质的绿色能源化利用提供理论基础和技术支持。

3 应用机器学习的工业有机固废气化研究分析

工业有机固废气化过程会发生一系列复杂的热化学反应,为深入理解其机理、优化操作条件、

技术参数及实现产物定向调控等带来挑战。在常用的数值模拟方法中,热力学模型假设了一个无法达到的平衡状态,而动力学和计算流体动力学模型由于反应复杂且难以理解,需要较高的计算成本^[62]。机器学习(ML)可以充分利用实验数据,建立各变量之间的相关性,从而快速预测未知

工况下的气化结果,推动有机固废的智能化和精细化处置(图3)。将机器学习应用于工业有机固废气化研究分析是创新、有前景的方法,其可利用大量的数据和模式识别算法,从复杂的气化反应系统中提取规律和关联,为气化过程的优化和控制提供有效的支持。

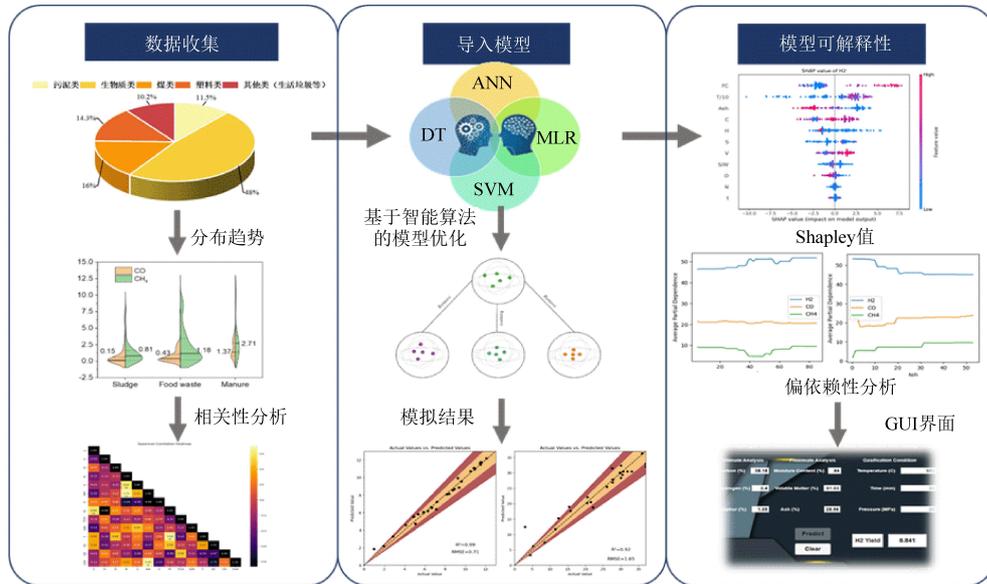


图3 机器学习预测工业固废气化特性流程

Fig. 3 Machine learning-based prediction workflow for industrial solid waste gasification characteristics

机器学习应用于热处置时,一般使用回归预测类型的机器学习算法,回归预测是指使用统计模型来预测连续型变量(数值型变量)的值。常用的回归预测算法主要包括:(1)简单模型类:K 临近算法,线性回归,支持向量机等,这类算法比较简单,容易实现,同时方便调节参数,一般适用于较小的预测样本,在预测大样本问题时,精度和曲线拟合效果欠佳。(2)神经网络类:主要包括各种类型的神经网络,例如 BP 神经网络,卷积神经网络等。神经网络类是最常用的回归预测算法,可用于大样本数据,优点是种类繁多,适用性很广,缺点是参数调节不当时,容易造成过拟合。(3)决策树类:主要包括简单决策树算法和随机森林算法,可用于多维度复杂样本的预测,但对数据集的丰富程度要求较高,不适用于稀疏数据集。

机器学习在预测气化实验或者共气化实验过程时,一般的输入参数为(1)物料自身属性:主要包括工业分析和元素分析,其中,元素的 C、H 等含量对预测结果的影响较大。(2)操作条件:主要包括气化温度、气化时间以及 ER 比,对于水蒸气气化则需要考虑水蒸气流量或水蒸气与物料比,其中 ER 和气化温度是最重要的 2 个参数。

HAQ 等^[63]为了准确地预测和分析输入参数对污水污泥超临界水气化产氢的影响,建立了 4 种不同模型。结果表明 GPR 模型在预测产氢量方面具有较好的效果($R^2 = 0.997$, 均方根误差 $RMSE = 0.093$),利用此模型预测氢气的重要特征参数的影响程度是温度>固定碳含量>压力,为污水污泥超临界水气化产氢预测提供了一种更精确、更易理解的方法。在此基础上,ASLAM KHAN 等^[64]开发了一个机器学习模型和粒子群优化(PSO)相结合的集成框架。结果表明,ELT-PSO 是预测产氢率的首选方法, R^2 达到了 0.997, $RMSE$ 仅为 0.093,根据 SHAP 特征的重要性分析,温度、碳、氢和压力是影响较大的参数。此外还通过调整 ML 超参数,实现 H₂ 产率的最大化。YANG 等^[65]采用 3 种 ML 模型,通过输入原料特性和操作条件,预测了城市生活垃圾气化过程中合成气、焦炭和焦油的分布以及合成气特性,减少实验成本以及寻找最佳生物质特性和城市生活垃圾气化工艺条件的工作量。结果发现,GBR 模型预测精度最高, $R^2 > 0.926$, $RMSE < 0.304$,ER 和含氢量对合成气产率和质量的预测贡献最大。WANG 等^[66]预测了含油污泥超临界水气化制氢特性,结

果表明,延长停留时间、提高停留温度和降低进料浓度均可促进超临界污泥制氢,其中温度起主导作用,当温度从 380 °C 提高到 555 °C 时,氢气产率提高了 2.63 倍。DIAO 等^[67]首次采用 ML 算法模拟了生物油蒸馏污泥与菜籽饼共热解炭的气化性能随反应时间和混合比例的变化规律, R^2 超过 0.992,表明人工神经网络的建模结果比动力学预测结果更准确。

此外,机器学习在共气化领域的研究还有待深入开展,目前的研究大多聚焦于某一具体物料的气化反应,对于多种有机固废共气化的研究缺乏之甚多,未来的研究方向可聚焦于此。先从 2 种具体物料的共气化预测模型入手,例如生物质与污泥的共气化产气特性预测,在输入参数中加入配比、协同效应等指标,后续再推进到范围更广的有机固废共气化预测模型。机器学习相较于其他的模拟方法,不需要 Aspen 太复杂的软件操作,也不需要 Fluent、计算流体力学里面复杂的模型。应用机器学习技术进行工业有机固废气化研究分析具有广阔的应用前景和发展空间,可以为气化技术的优化和创新提供新的思路和方法,推动气化技术向智能化、高效化和可持续发展方向发展。

4 工业有机固废气化的挑战和发展前景

工业有机固废气化技术作为一种可持续的废物处理和能源转化方式,具有广阔的发展前景,但同时也面临着诸多挑战。这些挑战来自技术、经济、环境以及政策等多个方面,需要综合考虑和解决。然而,近年来随着对工业有机固废气化研究的不断深入,工业有机固废气化技术将在环境保护和资源利用方面发挥越来越重要的作用。

工业有机固废气化技术在商业化应用方面仍面临着一定的技术难题。尽管已经取得了一些进展,但气化反应的稳定性、产物的纯度以及气化设备的稳定运行仍然是亟待解决的问题。此外,由于工业有机固废成分复杂多样,不同类型的废物可能需要针对性的气化工艺和参数优化,这增加了技术研究和开发难度。其次,经济性是工业有机固废气化技术面临的另一个挑战。气化设备的投资成本较高,运行和维护成本也不低,这使得工业有机固废气化技术在商业化应用中面临一定的经济压力。同时,气化过程中产生的气体可能含有杂质,需要进行后续处理,增加了额外处理成本。因此,如何降低气化技术的成本,提高经济性

是亟待解决的问题。此外,环境影响也是工业有机固废气化技术需要面对的重要挑战之一。虽然气化过程可以减少固体废物的堆积和对环境的污染,但其本身也可能产生污染物和有害气体,如 CO_2 、 CO 、 NO_x 等。因此,需要采取有效的措施来控制 and 减少气化过程对环境的影响,以确保气化技术的环境可持续性。

5 结 论

气化是一种环境友好、能量回收型的有机固废清洁热转化方法。与单一原料相比,多种有机固废的共气化通常表现出显著的效果,最终产物表现出更高的质量或更高的转化率。然而,目前还需要在工业有机固废共气化方面进行更多的研究和开发,特别是将工业有机固废作为原料,本文对工业有机固废气化的未来工作提供了一些建议。

首先,建立气化模型及产物数据库。由于大多数气化过程是利用工业有机固废和其他原料进行的,当前对工业有机固废间共气化的研究较少,导致缺乏信息,最终可能会在大规模工业应用过程中面临各种困难。其次,开展工业有机固废气化过程中 C、H、O 等元素的迁移转化路径原位分析。当前 H 自由基的迁移路径和相互作用尚未明确,原位表征技术研究可获得气化过程的动态瞬时信息,继而掌握共气化协同反应特征和协同反应路径,因此,结合量子化学计算、理论建模和机器学习预测是深入了解潜在催化作用及协同机制的有力工具,也将是该领域的下一个研究热点。最后,气化过程中多源工业有机固废原料的供应链潜力和生命周期评价是评估其可行性和成本效益的必要方法。通过对建模和模拟等先进工具的更多研究,可以最大限度地减少共气化的经济和环境影响限制。

参考文献 (References):

- [1] HU Qiang, DAI Yanjun, WANG C H. Steam co-gasification of horticultural waste and sewage sludge: Product distribution, synergistic analysis and optimization[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122780.
- [2] 张敏, 万俊锋, 王岩. 工业污泥建材化利用的研究进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(4): 1133-1138.
ZHANG Min, WAN Junfeng, WANG Yan. Research progress on the utilization of industrial sludge as building materials[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(4): 1133-1138.
- [3] LIANG Yu, XU Donghai, FENG Peng, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. *Journal of*

- Cleaner Production, 2021, 295: 126456.
- [4] POINEN P, BOKHOREE C. Sludge management practices; Drivers, opportunities and implications for small island developing states [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 48: 102860.
- [5] GAO Ningbo, KAMRAN K, QUAN Cui, et al. Thermochemical conversion of sewage sludge; A critical review[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 79: 100843.
- [6] HU Yisheng, PANG Kang, CAI Longhao, et al. A multi-stage co-gasification system of biomass and municipal solid waste (MSW) for high quality syngas production[J]. Energy, 2021, 221: 119639.
- [7] LI Bo, CHEN Heng, WU Hongshan, et al. A novel green methanol-heat cogeneration system based on municipal solid waste plasma gasification and coke oven gas; Energy, exergy, economic, and environmental assessment [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 311: 118510.
- [8] SOLIMAN A M S, TSCHECHSCHER R, AKPORIAE D, et al. Effect of Ni/SiO₂ catalyst preparation method on methane decomposition and CO₂ gasification cycles [J]. Fuel, 2024, 368: 131585.
- [9] CHENG Long, HU Qixing, ZHANG Zixuan, et al. Co-gasification behavior and products distribution of wet sewage sludge and corn stalks; Effect and mechanism analysis of self-moisture utilization[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 56: 717-724.
- [10] CHANG Yingju, CHANG J S, LEE D J. Gasification of biomass for syngas production; Research update and stoichiometry diagram presentation [J]. Bioresource Technology, 2023, 387: 129535.
- [11] CHEN Y H, LAN THAO NGO T N, CHIANG K Y. Enhanced hydrogen production in co-gasification of sewage sludge and industrial wastewater sludge by a pilot-scale fluidized bed gasifier[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(27): 14083-14095.
- [12] DAI Leilei, ZHOU Nan, LYU Yuancai, et al. Pyrolysis technology for plastic waste recycling; A state-of-the-art review [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, 93: 101021.
- [13] CHEN Guanbang, WU F H, FANG T L, et al. A study of co-gasification of sewage sludge and palm kernel shells[J]. Energy, 2021, 218: 119532.
- [14] STRAKA P, BUČKO Z. Co-gasification of a lignite/waste-tyre mixture in a moving bed[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(10): 1202-1206.
- [15] 高东亮, 别如山. 造纸废渣水蒸气气化制取富氢燃气实验研究[J]. 工业锅炉, 2023(2): 7-12+17.
GAO Dongliang, BIE Rushan. Experimental study on steam gasification of papermaking waste residue for hydrogen-rich gas production[J]. Industrial Boilers, 2023(2): 7-12+17.
- [16] 陈志文, 张晨光, 杨航, 等. 汽车拆解废弃物固定床空气气化特性[J]. 环境工程学报, 2024, 18(1): 253-260.
CHEN Zhiwen, ZHANG Chenguang, YANG Hang, et al. Study on gasification characteristics of automotive shredder residue [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(1): 253-260.
- [17] GONG Weijin, HUANG Lei, GUO Lina, et al. Catalytic gasification of textile wastewater treatment sludge for hydrogen production in supercritical water with K₂CO₃/H₂O₂: Reaction variables, mechanism and kinetics[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(78): 30310-30322.
- [18] MOLES S, MARTINEZ I, SOLEDAD CALLÉN M, et al. Pilot-scale study of sorption-enhanced gasification of sewage sludge [J]. Fuel, 2024, 360: 130611.
- [19] DANG K D N, NGO Q N, LE P K, et al. Recovery of aluminum from plastic packages containing aluminum by gasification [J]. Waste Management, 2024, 178: 385-394.
- [20] ERDOGAN A A, YILMAZOGLU M Z. Experimental and numerical investigation of medical waste disposal *via* plasma gasification[J]. Applied Energy, 2024, 353: 122014.
- [21] JANČAUSKAS A, STRIŪGAS N, ZAKARAUSKAS K, et al. Experimental investigation of sorted municipal solid wastes producer gas composition in an updraft fixed bed gasifier[J]. Energy, 2024, 289: 130063.
- [22] HU Mingtao, DENG Wenyi, SU Yaxin, et al. Production of hydrogen-rich syngas through microwave-assisted gasification of sewage sludge in steam-CO₂ atmosphere[J]. Fuel, 2024, 357: 129855.
- [23] MA Yuna, ZHA Zhenting, HUANG Chen, et al. Gasification characteristics and synergistic effects of typical organic solid wastes under CO₂/steam atmospheres [J]. Waste Management, 2023, 168: 35-44.
- [24] WANG Qing, ZHANG Xu, CUI Da, et al. Effect of pressure on the pyrolysis and gasification mechanism of corn stovers from kinetics [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 176: 106267.
- [25] ŚPIEWAK K, SOPRYCH P, CZERSKI G. Influence of pressure and sunflower husks ash as catalyst on tire-char steam gasification[J]. Energy Reports, 2023, 9: 1-15.
- [26] 郭鹏. 城市污泥高效干化及气化资源化利用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 41-43.
GUO Peng. Research on efficient drying and gasification resource utilization of urban sludge [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 41-43.
- [27] HASHEMISOHI A, WANG Lijun, SHAHBAZI A. Numerical analysis of biomass gasification in a fluidized bed reactor using a computational fluid dynamics model integrated with reduced-order reaction kinetics [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, 206: 1-11.
- [28] LI Linhu, LI Xujun, CAO Wen. Reaction pathway and kinetics study on supercritical water gasification of oily sludge[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 170: 105920.
- [29] LI Linhu, CAO Wen, WANG Gaoyun, et al. Experimental and kinetic study of heavy metals transformation in supercritical water gasification of oily sludge[J]. Journal of

- Cleaner Production, 2022, 373: 133898.
- [30] QUAN L M, KAMYAB H, YUZIR A, et al. Review of the application of gasification and combustion technology and waste-to-energy technologies in sewage sludge treatment[J]. Fuel, 2022, 316: 123199.
- [31] TEZER Ö, KARABAĞ N, ÖNGEN A, et al. Syngas production from municipal sewage sludge by gasification process: Effects of fixed bed reactor types and gasification agents on syngas quality[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 56: 103042.
- [32] CHEN G B, CHANG C Y. Co-gasification of waste shiitake substrate and waste polyethylene in a fluidized bed reactor under CO₂/steam atmospheres [J]. Energy, 2024, 289: 129967.
- [33] LI Linhu, WANG Gaoyun, LI Xujun, et al. Experimental study on alkali catalytic gasification of oily sludge in supercritical water with a continuous reactor[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 327: 116957.
- [34] LIU Qian, SUN Jianguo, MENG Zhuhui, et al. Gasification characteristics of refuse derived fuels in a fluidized bed; Effect of process parameters and catalytic reforming[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 111: 101435.
- [35] CHEN Yunan, YI Lei, WEI Wenwen, et al. Hydrogen production by sewage sludge gasification in supercritical water with high heating rate batch reactor [J]. Energy, 2022, 238: 121740.
- [36] NAM J Y, TOKMURZIN D, YOON S M, et al. Carbon dioxide gasification characteristics of disposable COVID-19 masks using bubbling fluidized bed reactor[J]. Environmental Research, 2023, 235: 116669.
- [37] PARRILLO F, ARDOLINO F, BOCCIA C, et al. Co-gasification of plastics waste and biomass in a pilot scale fluidized bed reactor[J]. Energy, 2023, 273: 127220.
- [38] VONK G, PIRIOU B, FELIPE DOS SANTOS P, et al. Felipe Dos Santos, et al. Comparative analysis of wood and solid recovered fuels gasification in a downdraft fixed bed reactor[J]. Waste Management, 2019, 85: 106-120.
- [39] LI Jianfen, LIAO Shiyan, DAN Weiyi, et al. Experimental study on catalytic steam gasification of municipal solid waste for bioenergy production in a combined fixed bed reactor[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 46: 174-180.
- [40] UMBERTO A, FABRIZIO D G. Fluidized bed gasification of industrial solid recovered fuels[J]. Waste Management, 2016, 50: 86-92.
- [41] LI Weiwei, WANG Chen, SONG Yuncai. Simulation of waste tire gasification in bubbling fluidized bed by Aspen; Contribution ratio analysis [J]. Renewable Energy, 2024, 222: 119995.
- [42] DUYGU G H, KAAAN E, ADAN M. Investigation of hydrogen production via waste plastic gasification in a fluidized bed reactor using Aspen Plus [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(99): 39315-39329.
- [43] CHEN Yunan, YI Lei, YIN Jiarong, et al. Sewage sludge gasification in supercritical water with fluidized bed reactor: Reaction and product characteristics[J]. Energy, 2022, 239: 122115.
- [44] LI Jinhu, YE Xinhao, BURRA K G, et al. Synergistic effects during co-pyrolysis and co-gasification of polypropylene and polystyrene[J]. Applied Energy, 2023, 336: 120750.
- [45] DAI Ying, LIU Guojun, LIANG Hongxin, et al. Co-gasification characteristics of Ca-rich sludge and Fe-rich sludge under CO₂ atmosphere, and potential utilization of gasification residues as renewable catalyst in biomass pyrolysis[J]. Renewable Energy, 2024, 224: 120118.
- [46] LO Y P, PRABU S, CHANG M B, et al. Hydrogen production and pollutants emission characteristics by co-gasified of paper-mill sludge and automobile shredder residues in a commercial scale fluidized bed gasifier[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 46-57.
- [47] PANG Yunhui, ZHU Xiaoli, SUN Yanbo, et al. Research on co-gasification of polyethylene and cellulose *via* reactive molecular dynamics simulation[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 111: 101382.
- [48] HANNL T K, SKOGLUND N, PRIŠČÁK J, et al. Bubbling fluidized bed co-combustion and co-gasification of sewage sludge with agricultural residues with a focus on the fate of phosphorus[J]. Fuel, 2024, 357: 129822.
- [49] YANG Ye, ZHU Jinjiao, YANG Li, et al. Co-gasification characteristics of scrap tyre with pine sawdust using thermogravimetric and a whole-tyre gasifier reactor[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 37-42.
- [50] SMOLIŃSKI A, HOWANIEC N. Experimental investigation and chemometric analysis of gasification and co-gasification of olive pomace and Sida Hermaphrodita blends with sewage sludge to hydrogen - rich gas[J]. Energy, 2023, 284: 129208.
- [51] WANG Zhiwei, LI Jinhu, BURRA Kiran G, et al. Synergetic effect on CO₂-assisted co-gasification of biomass and plastics [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2021, 143: 031901-1.
- [52] NG W C, YOU S, LING R, et al. Co-gasification of woody biomass and chicken manure: Syngas production, biochar reutilization, and cost-benefit analysis[J]. Energy, 2017, 139: 732-742.
- [53] YANG Zhanyu, KOH S K, NGWC, et al. Potential application of gasification to recycle food waste and rehabilitate acidic soil from secondary forests on degraded land in Southeast Asia[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 172: 40-48.
- [54] HERMOSO ORZÁEZ M J, MOTA PANIZIO R, CARMO CALADO L, et al. Thermochemical and economic analysis for energy recovery by the gasification of WEEE plastic waste from the disassembly of large-scale outdoor obsolete luminaires by LEDs in the alto alentejo region (Portugal) [J]. Applied Sciences, 2020, 10(13): 4601.
- [55] AJORLOO M, GHODRAT M, SCOTT J, et al. Experimental analysis of the effects of feedstock composition on the plastic

- and biomass co-gasification process[J]. *Renewable Energy*, 2024, 231: 120960.
- [56] OUADI M, BRAMMER J G, KAY M, et al. Fixed bed downdraft gasification of paper industry wastes[J]. *Applied Energy*, 2013, 103: 692–699.
- [57] PALI R, HUSSAMELDIN I. Technical feasibility of biomass and paper-mill sludge co-gasification for renewable fuel production using Aspen Plus[J]. *Energy*, 2022, 258: 124883.
- [58] HAN long, WANG Zhonghui, WU Pingjiang, et al. Fluidized bed chemical looping gasification of sewage sludge with bituminous coal to produce H₂ rich syngas: An examination on fuel synergy and reaction conditions[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2023, 111: 101442.
- [59] ZHANG Wenqi, CHEN Jianbiao, FANG Hua, et al. Simulation on co-gasification of bituminous coal and industrial sludge in a downdraft fixed bed gasifier coupling with sensible heat recovery, and potential application in sludge-to-energy[J]. *Energy*, 2022, 243: 123052.
- [60] ERDEM K, HAN D G, MIDILLI A. A parametric study on hydrogen production by fluidized bed co-gasification of biomass and waste plastics[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52: 1434–1444.
- [61] YIN Kexin, WANG Yangyang, WU Qiming, et al. Thermodynamic analysis of a plasma co-gasification process for hydrogen production using sludge and food waste as mixed raw materials [J]. *Renewable Energy*, 2024, 222: 119893.
- [62] XUE Peixuan, CHEN Tianlang, HUANG Xiehan, et al. Prediction of syngas properties of biomass steam gasification in fluidized bed based on machine learning method [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 356–370.
- [63] HAQ Z U, ULLAH H, KHAN M N A, et al. Hydrogen production optimization from sewage sludge supercritical gasification process using machine learning methods integrated with genetic algorithm[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 184: 614–626.
- [64] ASLAM KHAN M N, HAQ Z U, ULLAH H, et al. Prediction of hydrogen yield from supercritical gasification process of sewage sludge using machine learning and particle swarm hybrid strategy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 54: 512–525.
- [65] YANG Yadong, SHAHBEIK H, SHAFIZADEH A, et al. Predicting municipal solid waste gasification using machine learning: A step toward sustainable regional planning[J]. *Energy*, 2023, 278: 127881.
- [66] WANG Yulong, WANG Shuzhong, QI Hongyuan, et al. Characteristics and prediction model of hydrogen production of oily sludge by supercritical water gasification [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(30): 11191–11204.
- [67] DIAO Rui, YANG Yaojun, CHEN Tao, et al. Comparative investigation on gasification performances of co-pyrolytic char from bio-oil distillation sludge and rapeseed cake: Decomposition, kinetic, structural and prediction characteristics [J]. *Fuel*, 2023, 332: 125884.