

“双碳”目标下城市生活垃圾制氢技术研究进展^{*}

付 乾

(上海环境卫生工程设计院有限公司,上海 200232)

摘要 在全球碳减排的背景下,中国提出了实现“碳达峰碳中和”的“双碳”目标。利用城市生活垃圾中的生物质能制氢符合“双碳”目标要求。目前,城市生活垃圾制氢技术包括热化学转化、生物转化等直接制氢技术和结合甲烷重整制氢技术与城市生活垃圾厌氧发酵技术的间接制氢技术两大类。间接制氢技术因成熟可靠而成为当下城市生活垃圾制氢的主流工程化应用方向。城市生活垃圾前端分类、中端收运及末端处置系统的完善,将对生活垃圾制氢技术发展起到积极推动作用。

关键词 制氢技术 城市生活垃圾 垃圾分类 碳减排

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.02.017

Research process of hydrogen production technologies from municipal solid waste under targets of carbon peak and carbon neutrality FU Qian, (Shanghai Institute of Environmental Engineering Design Science Co., Ltd., Shanghai 200232)

Abstract: With the global carbon emission reduction, China puts forward the goals of carbon peak and carbon neutrality. Reutilization of municipal solid waste to produce hydrogen from biomass energy accords with the goals of carbon peak and carbon neutrality. At present, hydrogen production technologies from municipal solid waste include direct methods like thermochemical conversion and biological transformation, and indirect method of methane reforming technology combining anaerobic fermentation from municipal solid waste. Indirect method becomes the mainstream method for engineering application since its processes are mature and reliable. After the perfection of the first phase of classification, the middle phase of collection and transportation, and the last phase of disposal, it will have a positive influence on development of hydrogen production technologies.

Keywords: hydrogen production technology; municipal solid waste; waste classification; carbon emission reduction

为应对全球气候变化,我国提出了“2030年碳达峰、2060年碳中和”的“双碳”目标。在构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系中,氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源,具有高热值、零碳排放等特性,正在逐步成为全球能源绿色低碳转型过程中的重要载体,未来在交通领域、储能发电领域和化工冶金领域将发挥越来越重要的作用^[1-3]。

目前,制氢技术主要是化石能源制氢、工业副产制氢、电解水制氢和生物质制氢等,其中煤、天然气等化石能源作为原料制氢是当前最主要的氢能来源,占全球总量的90%以上。但是,化石能源制氢存在能源利用效率低和环境污染强度大等问题^[4-5]。因此,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,明显提升可再生能源制氢在终端能源消费中的比例。

城市生活垃圾具有可再生能源的属性,其资源

化利用价值较高^[6],然而当前的城市生活垃圾处置以填埋和焚烧为主,资源化利用程度较低。随着国内城市生活垃圾分类体系逐渐完善,分类后的城市生活垃圾为形成无废低碳、高效环保的垃圾—氢转换方式提供了有利条件^[7-8]。

因此,本研究拟对城市生活垃圾作为原料制备氢气的技术进行梳理总结,并对未来城市生活垃圾制氢领域的发展提出建议,以为发展城市生活垃圾制氢技术提供理论指导。

1 城市生活垃圾制氢技术总结

1.1 直接制氢技术

1.1.1 热化学转化制氢

(1) 热解法

热解是指在300~700℃的无氧或缺氧条件下,将有机物通过热化学转化的方式催化分解为易挥发

作者:付 乾,男,1986年生,硕士,高级工程师,研究方向为湿垃圾、渗滤液处理及资源化利用。

^{*}上海城投(集团)有限公司科技创新计划项目(2021年)(No.CTKY-ZDXM-2021-010)。

气体、液体碳氢化合物和高含碳量的固体物质,其中易挥发气体中就包含了氢气^{[9]6}。WANG 等^[10]研究发现,在催化温度 900 °C、镍基催化剂质量分数为 15%时,聚丙烯塑料热解产氢,每克聚丙烯塑料的氢气产量达到 40.24 mmol,加水更是可以提高到 134.91 mmol。PARK 等^[11]在研究连续流热解反应器热解厨余垃圾和木质纤维素时发现,进料质量比为 1:1 时,温度从 300 °C 升高至 700 °C,氢气等易挥发气体质量分数从 6.3%增至 17.5%。DEMIRBAS^[12]也发现,城市生活垃圾催化热解可产生富氢的易挥发气体,其产量也随温度升高而增加。杜丽娟等^[13]亦获得氢气产量随温度升高而增加的结论。热解法制氢技术可以生活垃圾中的纸类、橡塑类、竹木类作为原料,但需要镍等稀有金属作为催化剂,而且高温条件能耗高,导致运行成本也高,工艺稳定性也有待提高。

(2) 气化法

气化是指在超过 700 °C 的条件下,用气化剂(水蒸气、二氧化碳、空气、氧气等)将目标有机物热化学转化为氢气、一氧化碳、甲烷等可燃性气体^{[9]7}。JAMRO 等^[14]以城市生活垃圾为原料,发现间歇式气化反应器产氢的最佳条件:空气作为气化剂、气化温度为 704 °C、原料粒径为 3.21 mm、升温速率为 5 °C/min,此时可燃性气体产量最高达到 76.99%(质量分数),氢气摩尔分数可以达到 45.79%,氢气产率(指每千克城市生活垃圾的氢气产生量)为 13.83 mol/kg。EMAD 等^[15]研究发现,气化温度从 750 °C 升高至 950 °C,产物中可燃性气体质量分数从 45.12%升高至 92.08%,但其中氢气摩尔分数会从 32.17%降至 7.38%,综合考虑最佳气化温度应为 800 °C。RUOPPOLO 等^[16]用流化床对含木材和塑料的城市生活垃圾进行气化,当气化温度为 780 °C、镍作为催化剂、水蒸气作为气化剂时,产生的氢气体积分数最高为 36%,且产物中焦油含量较低。KARMAKAR 等^[17]采用鼓泡流化床反应器进行气化,气化剂为水蒸气、气化温度为 770 °C 时,氢气体积分数达到了 53%。王晶博等^[18]对城市生活垃圾进行原位水蒸气催化气化制氢研究发现,气化温度为 900 °C,在镍基催化剂作用下,可燃性气体产率达到 1.28 Nm³/kg,其中氢气体积分数为 52.8%,即氢气产率为 60.33 g/kg。吕鹏梅等^[19]采用常压鼓泡流化床进行气化制氢,气化剂为水蒸气,气化温度为 800 °C 时,可燃性气体产率达到 2.39 Nm³/kg,氢气产率为 61.86 g/kg。目前,气化过程的温度均需控制

在 700 °C 以上,运行成本较高,工程化运行案例较少。

(3) 超临界水气化法

超临界水气化是指将水与有机生物质原料混合后,设置反应器内压力在 22.05 MPa 以上、温度在 374.3 °C 以上的超临界状态所进行的反应。CAO 等^[20]研究发现,厨余垃圾在超临界水气化条件下,氢气产率为 38.29 mol/kg。董国华^[21]对不同厨余垃圾组分进行分类研究发现,在超临界水气化条件下,混合的厨余垃圾气化效果不如单一组分的好,其中豆油组分的氢气产率最高。

(4) 等离子体分解法

等离子体分解是指在高温、缺氧环境下,利用大量高能量的电子、离子、活性分子等等离子体将目标有机物部分氧化成二氧化碳、水、一氧化碳、氢气等气体产物和小分子无机碳氢化合物等固体产物^{[9]8}。BYUN 等^[22]采用热等离子体分解法分解城市生活垃圾,得到以氢气和一氧化碳为主的混合气体,通过水气转换还原一氧化碳为氢气,再经过变压吸附装置分离提纯后可日产 99.99% 的高纯度氢气 400 Nm³。超临界水气化法和等离子体分解法目前还处于研究阶段。

1.1.2 生物转化制氢

(1) 厌氧发酵法

厌氧发酵法一般以易腐的厨余垃圾作为原料,在厌氧环境条件下,利用多种厌氧或兼性厌氧微生物将碳水化合物、蛋白质、脂肪等复杂有机物分解成氢气、甲烷、二氧化碳等,包括水解酸化阶段、产氢产乙酸阶段和产甲烷阶段^[23]。通过调控 pH、温度等物理化学参数和水力停留时间(HRT)等动力学参数,可选择性地将整个厌氧系统控制在产氢产乙酸阶段,从而使得氢气产能最大化^[24-25]。CHU 等^[26]利用两相厌氧发酵产氢产甲烷反应器处理厨余垃圾可同时高效得到氢气和甲烷,在挥发性固体(VS)为 38.4 kg/(m³·d)或化学需氧量(COD)为 64.4 kg/(m³·d)的条件下,氢气和甲烷的产率分别为 205、464 mL/g。LIU 等^[27]采用控温两相厌氧发酵反应器处理厨余垃圾,控制温度为 55 °C、pH 为 5.5,产氢速率可以达到 250 mmol/(L·d)。两相厌氧发酵在高容积负荷下,产氢速率和氢气产率相较于单相厌氧发酵有显著提高。张高豪等^[28]将活性污泥和厨余垃圾按质量比 1:6 混合后作为原料,pH 控制在 5.0~6.0,采用中温厌氧发酵,氢气产率最高可达 94 L/kg。在城市生活垃圾中掺杂市政污泥作为原料进行厌氧发酵,氢气产率相对较高。刘新媛

等^[29]对厨余垃圾厌氧发酵产氢的工艺参数进行了总结,认为高温有利于提高产氢速率,适宜的 pH 应为 5.0~6.0, HRT 通常为 1~2 d。

(2) 生物光合法

生物光合制氢是在厌氧光照条件下,通过光合微生物的代谢作用,将小分子有机物的高能位氢离子还原为氢气。HAN 等^[30]初步研究了 *Rhodobacter sphaeroides* RV 光合制氢的优化条件。路朝阳等^[31]研究了 pH 对光合微生物产氢的影响,发现 pH 为 6.0 时,产氢速率达到 29.72 mL/(L·h)。张全国等^[32]优化的光合微生物产氢工艺条件为:光照强度 2 000~6 000 lx、温度 28~34 ℃、pH 5.0~8.0,最大产氢速率为 39.6 mL/(g·d)。

1.2 间接制氢技术

目前,国内外间接制氢主要以天然气和煤等化石燃料作为原料,有水蒸气重整制氢、甲烷重整制氢、部分氧化制氢、自然重整制氢等技术^[33-36]。

将甲烷重整制氢技术与城市生活垃圾厌氧发酵技术结合,把城市生活垃圾厌氧发酵产生的沼气提纯脱碳后间接制氢,具有工程化应用的基础和发展前景^[37-39],是当前的主流应用方向。

2 垃圾分类对城市生活垃圾制氢的影响

2.1 垃圾分类现状及趋势

我国在国家层面正积极推进垃圾分类,2019 年 6 月《住房和城乡建设部等部门关于在全国地级及以上城市全面开展生活垃圾分类工作的通知》(建城

[2019]56 号)提出:2025 年前,全国地级及以上城市要基本建成垃圾分类处理系统。2019 年 12 月 1 日《生活垃圾分类标志》(GB/T 19095—2019)实施。国内垃圾分类体系将逐渐完善,各城市也正在积极推进落实精细化垃圾分类管理^[40]。

近年,国内主要城市的生活垃圾物理组分情况如表 1 所示。由表 1 可见,西安的易腐类垃圾占比显著低于其他城市,主要原因是其他城市渣石类混于易腐类中,这是由于城市垃圾前端分类、中间清运等环节存在问题,因此在垃圾分类体系逐渐完善过程中应避免产生类似情况。

上海作为国内率先开展垃圾分类工作的重点城市,其《生活垃圾分类标志标识管理规范》(DB31/T 1127—2019)、《上海市生活垃圾管理条例》分别于 2019 年 5 月 1 日、7 月 1 日正式实施。表 2 对比了上海生活垃圾分类前后的物理组分变化,可以看到,在垃圾分类管理前,易腐类占比超过 60%,纸类和橡塑类占比均超过 10%,但是混合在一起很难分类利用;垃圾分类管理后,总体分成了湿垃圾和干垃圾,湿垃圾中易腐类集中,占比达到 98.9%,而干垃圾中纸类和橡塑类得到集中,总和占到 75.9%,易腐类占比则降到了 16.5%。上海通过三年的垃圾分类实践,总结出了具有经济循环、低碳发展、绿色引领等特点的“上海模式”,可成为未来国内城市生活垃圾精细化分类的示范者。当然,上海城市生活垃圾分类工作仍有提升空间,正在不断地探索之中。

2.2 垃圾分类体系对垃圾制氢发展的影响

表 1 国内主要城市的生活垃圾物理组分情况

Table 1 Physical composition distribution of municipal solid waste in major cities in China

城市	物理组分占比 ¹⁾ /%								文献来源
	易腐类	纸类	橡塑类	竹木类	织物类	金属类	玻璃类	渣石类	
北京	66.2	10.9	13.1	3.3	1.2	0.4	1.0	3.9	[41]
沈阳	60.4	7.9	12.9	2.5	3.6	2.1	5.4	5.3	[42]
上海	65.2	10.6	16.0	2.7	2.0	0.5	2.3	0.7	[43]
武汉	55.3	1.5	4.5	8.3	0.0	1.1	2.0	27.3	[44]
广州	53.4	8.3	18.6	1.7	10.0	0.4	1.4	6.2	[45]
成都	65.7	13.0	12.0	0.9	2.5	2.9	0.8	2.1	[46]
西安	38.6	9.3	10.1	7.4	1.4	3.4	6.5	23.3	[47]

注:¹⁾以质量分数计,表 2 同。

表 2 上海城市生活垃圾分类前后物理组分变化情况

Table 2 Physical composition change of municipal solid waste before and after implementation of waste classification

城市生活垃圾分类	物理组分占比/%								文献来源
	易腐类	纸类	橡塑类	竹木类	织物类	金属类	玻璃类	渣石类	
分类前	65.2	10.6	16.0	2.7	2.0	0.5	2.3	0.7	[43]
分类后	干	16.5	35.6	40.3	0.9	2.5	0.7	2.9	[8]
	湿	98.9	0.2	0.7		0.2 ¹⁾			

注:¹⁾指竹木类、织物类、金属类、玻璃类、渣石类合计占比 0.2%。

GB/T 19095—2019 在大件垃圾和装修垃圾单独分类的基础上将生活垃圾分为可回收物、厨余垃圾、其他垃圾、有害垃圾 4 大类,其中厨余垃圾和其他垃圾也就是常说的湿垃圾和干垃圾,这两类垃圾的主要物理组分包括纸类、橡塑类、竹木类、织物类、金属类、玻璃类、易腐类等。根据第 1 部分的城市生活垃圾制氢技术总结可知,利用厌氧发酵的直接制氢和间接制氢技术的原料主要都是易腐类,而热化学转化制氢技术的原料主要是纸类、橡塑类、织物类、竹木类等。相对而言,热化学转化制氢的产能和效率较高。

在垃圾管理前,厨余垃圾需要先进行筛分、磁选等预处理将橡塑类、竹木类等物质去除才能进入厌氧发酵单元,以保证后续发酵浆液中的有机质含量。热化学转化制氢前,也需要将含水率较高的易腐类去除,才能保证转化效率和氢气产率。

上海在分类收运、分类处置的体系下,干垃圾中纸类和橡塑类占比超过了 75%,这两类垃圾可以进行混合热解^[48-49],易腐类占比只有 16.5%,基本不会影响纸类和橡塑类干垃圾直接热化学转化制氢。湿垃圾基本都是易腐类,纸类、橡塑类等其他垃圾可忽略不计,由于湿垃圾中易腐类的有机物含量高,大大缩短了厌氧发酵前的预处理过程,使得发酵效率和沼气产能提高,进而便于沼气、氢气利用,为湿垃圾厌氧发酵技术处置和资源化利用创造了有利条件。

由此可见,城市生活垃圾分类为城市生活垃圾制氢提供了更大的工程实施可能性,对城市生活垃圾制氢技术发展和应用产生一定的正向推进作用。

3 结论与建议

(1) 城市生活垃圾制氢技术包括直接制氢技术和间接制氢技术两类,前者包括厌氧发酵法、生物光合法、热解法、气化法、等离子体分解法和超临界水气化法等,后者主要是垃圾厌氧发酵技术与甲烷重整制氢的联合工艺。间接制氢技术因工艺成熟可靠而成当下城市生活垃圾制氢的主流方向。

(2) 规范垃圾分类体系对城市生活垃圾处置和制氢技术的发展都具有积极作用。

(3) 城市生活垃圾制氢和垃圾处置统筹考虑,可采用制氢站和加氢站一体化建设的模式,从而可规避氢气储运环节的安全风险大、能源损耗多、成本消耗高等问题。

参考文献:

- [1] 李佳琪,徐潇源,严正.大规模新能源汽车接入背景下的电氢能源与交通系统耦合研究综述[J].上海交通大学学报,2022,56(3):253-266.
- [2] 章俊良,程明,罗夏爽,等.车用燃料电池电堆关键技术研究现状[J].汽车安全与节能学报,2022,13(1):1-28.
- [3] 朱凯,张艳红.“双碳”形势下电力行业氢能应用研究[J].发电技术,2022,43(1):65-72.
- [4] 李星国.氢气制备和储运的状况与发展[J].科学通报,2022,67(4/5):425-436.
- [5] 苗安康,袁越,吴涵,等.“双碳”目标下绿色氢能技术发展现状与趋势研究[J].分布式能源,2021,6(4):15-24.
- [6] 郭浩.城市生活垃圾处理技术现状及未来发展趋势[J].云南化工,2020,47(9):21-25.
- [7] 贾悦,李骁勇,杨小云.上海市 1986—2019 年生活垃圾理化特性变化规律研究[J].环境卫生工程,2021,29(3):20-25.
- [8] 董晓丹.分类生活垃圾理化特性分析[J].上海环境科学,2021,40(1):34-40.
- [9] IPCC.2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R].Geneva:IPCC,2019.
- [10] WANG S X, ZHANG Y Y, SHAN R, et al. High-yield H₂ production from polypropylene through pyrolysis-catalytic reforming over activated carbon based nickel catalyst[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 352: 131566.
- [11] PARK C, LEE N, KIM J, et al. Co-pyrolysis of food waste and wood bark to produce hydrogen with minimizing pollutant emissions[J]. Environmental Pollution, 2021, 270: 116045.
- [12] DEMIRBAS A. Gaseous products from biomass by pyrolysis and gasification: effects of catalyst on hydrogen yield[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(7): 897-909.
- [13] 杜丽娟,李建芬,肖波,等.生物质催化裂解制合成气的研究[J].化学工程师,2008,22(6):3-4,9.
- [14] JAMRO I A, CHEN G, BALOCH H A, et al. Optimization of municipal solid waste air gasification for higher H₂ production along with the validation via kinetics and statistical approaches[J]. Fuel, 2022, 322: 124-137.
- [15] EMAD N, VAHID B. Hydrogen production from co-gasification of asphaltene and plastic[J]. Petroleum Science and Technology, 2019, 37(16): 1905-1909.
- [16] RUOPPOLO G, AMMENDOLA P, CHIRONE R, et al. H₂-rich syngas production by fluidized bed gasification of biomass and plastic fuel[J]. Waste Management, 2012, 32(4): 724-732.
- [17] KARMAKAR M K, DATTA A B. Generation of hydrogen rich gas through fluidized bed gasification of biomass[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1907-1913.
- [18] 王晶博,张静,冯宇,等.基于 NiO/MD 催化剂的城市生活垃圾原位水蒸气催化气化制氢研究[J].安徽农业科学,2015,43(35):84-87.
- [19] 吕鹏梅,常杰,熊祖鸿,等.生物质在流化床中的空气-水蒸气

- 气化研究[J].燃料化学学报,2003,32(4):305-310.
- [20] CAO W, WEI Y, JIN H, et al. Characteristic of food waste gasification in supercritical water for hydrogen production[J]. Biomass and Bioenergy, 2022, 163: 106508.
- [21] 董国华. Ni-BN/Al₂O₃催化餐厨垃圾亚临界水热制氢的研究[D].南京:南京农业大学, 2020.
- [22] BYUN Y, CHO M, CHUNG J W, et al. Hydrogen recovery from the thermal plasma gasification of solid waste[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1/2/3): 317-323.
- [23] BAUER C G, FOREST T W. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on S.I. engine performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2001, 26(1): 55-70.
- [24] KIM S H, HAN S K, SHIN H S. Optimization of continuous hydrogen fermentation of food waste as a function of solids retention time independent of hydraulic retention time[J]. Process Biochemistry, 2008, 43(2): 213-218.
- [25] HAN W, CHEN H, JIAO A, et al. Biological fermentative hydrogen and ethanol production using continuous stirred tank reactor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(1): 843-847.
- [26] CHU C F, LI Y Y, XU K Q, et al. A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(18): 4739-4746.
- [27] LIU C, WANG J, JI X, et al. The biomethane producing potential in China: a theoretical and practical estimation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(7): 920-928.
- [28] 张高豪, 王翩, 李魏滴, 等. 餐厨垃圾除臭及厌氧发酵产氢工艺的研究[J]. 山东化工, 2021, 50(20): 254-255.
- [29] 刘新媛, 鲍振博, 彭锦星, 等. 餐厨垃圾厌氧发酵制氢技术的研究进展[J]. 天津农学院学报, 2017, 24(2): 95-99.
- [30] HAN H L, JIA Q B, LIU B Q, et al. Fermentative hydrogen production from acetate using *Rhodobacter sphaeroides* RV[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(25): 10773-10778.
- [31] 路朝阳, 王毅, 曹明, 等. 酸碱度对玉米秸秆酶解液光合生物产氢动力学的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 262-266.
- [32] 张全国, 王素兰, 尤希凤. 光合菌群产氢量影响因素的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 182-185.
- [33] 王奕然, 曾令志, 娄舒洁, 等. 天然气制氢技术研究进展[J]. 石化技术与应用, 2019, 37(5): 361-366.
- [34] IGNACIO D I, GRACIELA B, FERNANDO M. Nickel-based doped ceria-supported catalysts for steam reforming of methane at mild conditions[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2017, 39(2): 129-133.
- [35] 贺天智, 蔡磊, 管延文, 等. 甲烷蒸汽重整制氢反应路径研究[J]. 煤气与热力, 2020, 40(3): 34-44.
- [36] 贺隼, 吴素芳. 吸附强化的甲烷水蒸汽重整制氢反应特性[J]. 化学反应工程与工艺, 2007, 23(5): 470-473.
- [37] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 1-8.
- [38] 陈彬, 谢和平, 刘涛, 等. 碳中和背景下先进制氢原理与技术研究进展[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 106-116.
- [39] 唐弓斌, 陈一帆, 肖锋, 等. 餐厨垃圾厌氧产氢净化工艺研究[J]. 现代化工, 2017, 37(3): 183-186.
- [40] 孙晓杰, 王春莲, 李倩, 等. 中国生活垃圾分类政策制度的发展演变历程[J]. 环境工程, 2020, 38(8): 65-70.
- [41] WANG H, WANG C. Municipal solid waste management in Beijing: characteristics and challenges[J]. Waste Management and Research, 2013, 31(1): 67-72.
- [42] 马铮铮. 沈阳市生活垃圾调查及处置方式研究[J]. 环境卫生工程, 2010, 18(2): 13-18.
- [43] 董晓丹, 张玉林. 上海市生活垃圾理化特性调查分析[J]. 环境卫生工程, 2016, 24(6): 18-21.
- [44] 李立. 武汉市城乡生活垃圾处理可持续发展研究[J]. 生态经济, 2010(5): 156-158.
- [45] 陈晓梅. 城市生活垃圾卫生填埋场甲烷利用研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- [46] 刘育辰. 四川省城市生活垃圾特性及其重金属污染分析[D]. 成都: 四川农业大学, 2015.
- [47] 袁慧芳, 韩雅娇, 周秋丹, 等. 西安市生活垃圾组成及现状分析[J]. 广东化工, 2013, 40(21): 125-126.
- [48] 张莹, 俞春磊, 包尤思, 等. 城市生活垃圾典型组分单一及混合热解特性研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(4): 65-72.
- [49] 于杰, 徐鹏举, 常加富, 等. 城镇生活垃圾典型组分热解特性分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(3): 86-88.

编辑: 陈锡超 (收稿日期: 2022-10-09)