

# 垃圾制氢技术研发与产业化进展

李坤，李欢

（中国电子信息产业发展研究院，北京100846）

**摘要：**研发大规模、低成本、低碳排放量的制氢技术是氢能实现产业化的前提条件，是氢能产业发展亟待解决的问题。垃圾中含有大量有机组分，经处理可分解出氢气，有望成为制氢技术创新的重要突破口。从热化学技术和生物化学技术两方面，梳理总结了国内外垃圾制氢技术研发进展和产业化现状，分析了当前垃圾制氢技术研发和产业化面临的主要问题，并提出了针对性的对策建议。研究发现：基于热化学过程的垃圾气化制氢技术是垃圾制氢产业化的主流方向；全球多个国家正在探索垃圾制氢产业化之路，但当前整体处于研究示范阶段，面临减碳仍需进一步深化、能源利用效率仍需提高等问题；从我国垃圾原料性质、制氢技术进展等看，还应从垃圾分类、制氢技术装备研发、碳捕集封存利用技术创新、项目试点示范等方面推进我国垃圾制氢研发与产业化进程。

## 引言

### 氢能具

有储量大、储存稳

定、转化效率高、零排放等优势，是

未来净零排放能源系统不可或缺的组成部分<sup>[1-2]</sup>

。近年来，越来越多国家高度重视氢能的发展与其在氢燃料电池等领域的应用。日本、欧盟、美国等发达国家已经将氢能上升到支撑国家能源、气候、经济、科技、安全的战略高度，加快部署和推进氢能产业发展。

氢能全产业链包括“制—储—运—输—用”五大环节，其中制氢是第一个重要环节。国际能源署数据显示，2020年，全球氢气供应量约9000万吨，主要来源是化石燃料制氢，其中天然气制氢约占59%，煤制氢约占19%，工业副产氢约占21%，

来自电解水制氢、化石

燃料配备碳捕集封存利用的低碳氢分别仅占0.0

3%、0.7%，合计不足1%<sup>[3]</sup>

。以化石燃料为主要制氢来源，虽然规模大、成本低，但带来的一个显著问题就是高碳排放量。2020年，全球氢气的直接碳

排放量高达9亿

吨，约占全球能源和工业碳排

放量的2.5%，与我国碳排放量最高的山东省、河北省相当<sup>[4]</sup>

。电解水制氢、化石燃料配备碳捕集封存利用的碳排放量低，但成本高，而且前者规模更小。因此，寻找大规模、低成本、低碳排放量的氢气供给已成为氢能产业发展过程中的重要议题。

碳排放量较低的制氢方式有技术相对成熟的电解水制氢和甲醇重整制氢，以及生物或生物质制氢、垃圾制氢、太阳能光解水制氢、热化学分解水制氢等试验性方法<sup>[5]</sup>

。近年来，垃圾制氢以其成本优势获得了学术界和产业界的关注。垃圾气化制氢的总生产成本约为28.74元/千克，其中垃圾气化工段成本为13.80

元/千克，合成气净化、氢气分离提纯工段成本为14.94

元/千克<sup>[6]</sup>

。按照这一测算，垃圾制氢成

本比我国已建电解水示范项目的氢气成本36.4元/千克要低<sup>[7]</sup>

。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<sup>[6]</sup>

。垃圾制氢项目的收入方面，除了氢气销售收入，还包括垃圾处理费、残渣销售收入，以及可能的碳交易收入，能有效分摊制氢成本、降低氢气价格。此外，垃圾制氢技术还具有重要现实意义：一是助推垃圾处理减量化、资源化、无害化。与填埋、堆肥和焚烧等传统垃圾处理方式相比，气化占地面积小，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。二是缓解局部资源短缺导致的制氢瓶颈。鉴于部分地区垃圾量大、分布广泛，以垃圾为原材料制氢，有助于各地区丰富氢能来源、增加氢气供给、缓解用氢紧张。

目前，国内与垃圾制氢直接相关的研究主要集中在餐厨垃圾厌氧发酵制氢、垃圾渗滤液超临界水气化制氢、生物质制氢、塑料制氢等技术领域，尚缺乏综合性的、结合产业进展的研究。本文首先梳理总结了当前垃圾制氢技术的研究现状与产业化进展情况，然后分析了当前垃圾制氢技术研发和产业化面临的主要问题，并提出了针对性的对策建议，旨在为我国氢能领域的技术创新和产业发展提供参考依据。

## 1垃圾制氢技术研究现状

根据技术原理的不同，垃圾制氢技术可分为热化学和生物化学两大类，以下对这两类技术分别进行介绍。

### 1.1热化学技术

热化学技术顾名思义是基于热化学过程的垃圾制氢技术，原理是有机物在缺氧、高温条件下被分解为以氢气、一氧化碳、甲烷为主的合成气；无机物则被熔化成金属和玻璃体渣，用于路基、建材等的原材料。典型的热化学过程包括热解和气化，热解可用于气化之前，以提高原料的热值。热化学技术适用于可燃固体废弃物，它是垃圾中的可燃组分，常见的可燃固体废弃物包括纸类、塑料类、木料类、织物类以及垃圾衍生燃料。热化学过程在垃圾处理方面的优势在于减量化，可以最大程度保留垃圾填埋场的空间。据测算，热化学处理后，垃圾质量减少70%~80%，体积减小约80%~90%<sup>[8]</sup>。

#### 1.1.1热解

垃圾热解过程通常在中等温度、高压、隔绝氧气的环境下进行。温度对氢气产率的影响较大。在一个生物质热解实验中，把反应温度从800 提高至1000 ，氢气产率可从12.0%提高至28.2%<sup>[9]</sup>。

。催化剂可以提高热解过程的效率，常用的催化剂种类有氯化物、碳酸盐和铬酸盐等。由于反应温度相对较低、压强相对较高，垃圾热解过程获得的产物分子量通常高于气化过程，会产出生物油、生物炭等非气态物质，合成气中氢气的含量也相对较低。因此，在制氢领域，热解过程通常在二阶段反应流程中出现，产物用于后续的重整、气化过程，以提高氢气产率<sup>[10]</sup>。

。垃圾热解—重整两阶段制氢简化流程如图1所示。从工艺成熟度、氢气产率方面来讲，气化制氢技术相较于热解制氢技术更具优势。

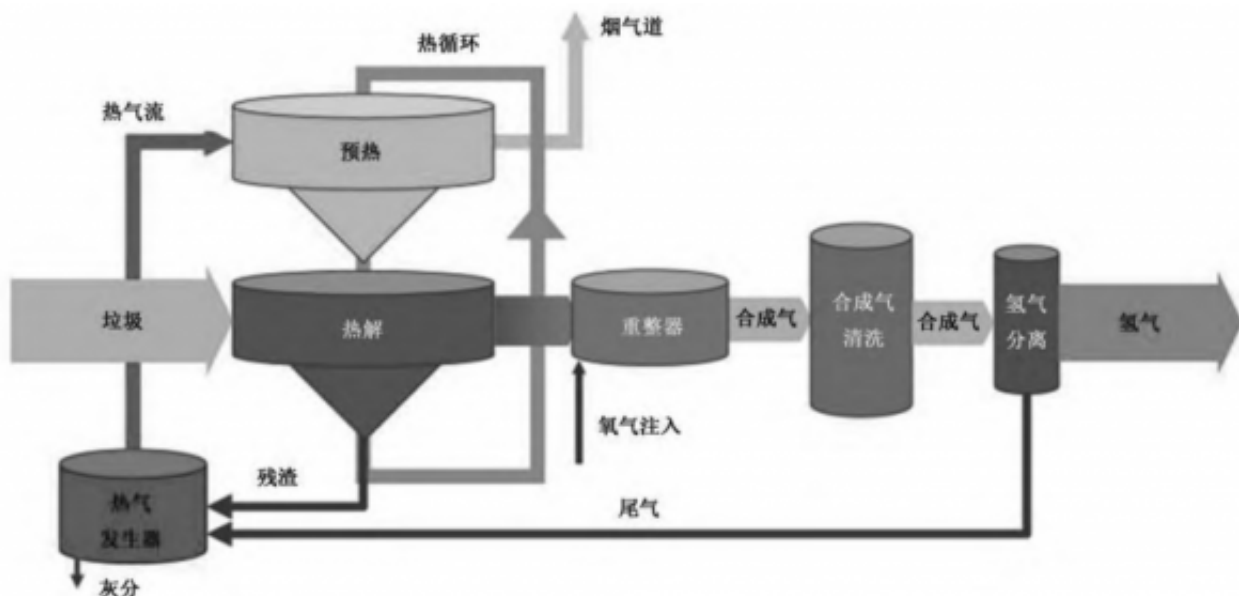


图1 垃圾热解—重整两阶段制氢简化流程

#### 1.1.2气化

垃圾气  
化制氢过程为垃圾  
和气化剂在1个大气压下的缺氧环境中

的反应过程,反应温度通常在500~1200<sup>[11-12]</sup>,热效率通常为35%~50%<sup>[13]</sup>

。缺氧条件有助于减少热量损失并提高能量回收效率。反应温度对制氢的效率也有较大影响。在工程实践中,每个反应器都存在最佳的反应温度:当反应温度低于最佳温度时,随着温度的升高,反应速率提高,氢气产率增加;当反应温度超过最佳温度时,裂解和重整反应的能力随着温度升高而下降,氢气产率随之降低<sup>[14]</sup>。

气化剂的种类和比率对垃圾制氢的效率也有影响。典型的气化剂包括空气、富氧空气、纯氧或蒸汽等。不同气化剂的热值不同,蒸汽和纯氧热值较高。在标准温度和压力下,高热值(HHV)为9.2~16.5MJ/m<sup>3</sup>,空气热值较低,仅为3.5~7.8MJ/m<sup>3</sup><sup>[15]</sup>

。研究表明,当实际氧气流量与化学计量氧气流量当量比(ER)未处于最佳区域(燃烧区ER约为1)时,随着ER增加,氢气产率随之增加<sup>[16]</sup>

。蒸汽与生物质的比率对提高气化反应的效率很重要,因为蒸汽重整反应是产生氢气的主要反应,过量的蒸汽会导致氢气产量减少并促进焦油形成<sup>[17]</sup>。

在气化制氢反应中,使用催化剂有助于降低反应活化能,提高转化程度,进而提高氢气产率。催化剂种类包括镍基催化剂、碱基催化剂、天然矿石类催化剂、生物炭、氧化钙等。橄榄石和白云石等天然矿石类催化剂可通过采矿直接获得

,具有成

本优势,实际应用

中使用频率较高。镍基催化剂除了提高转化程度,还可以抑制焦油、焦炭和CO<sub>2</sub>等副产物的形成,进一步提高氢气产率<sup>[18]</sup>

。新型的生物炭催化剂成本低、效果好,可将生物油蒸汽重整的制氢率提高至89.13%<sup>[19]</sup>

。氧化钙在垃圾原位水蒸气气化反应中能够吸收CO<sub>2</sub>,促进氢气产生,使氢气产率从10.86g/kg提高至31.56g/kg<sup>[20]</sup>

。但是,由于垃圾中含有硫化物、微粒和微量金属等对催化剂有害的物质,催化剂普遍存在中毒失活的问题,会影响催化剂的寿命和成本<sup>[21-22]</sup>

。开发高活性、长寿命、低成本、抗积炭的催化剂成为垃圾气化制氢大规模产业化的前提。

根据气化设备不同,气化制氢技术可分为固定床气化技术、沸腾床气化技术、循环流化床气化技术、回转窑气化技术、机械炉排气化技术、等离子气化技术等。等离子气化技术由于不产生二噁英、减量化效果好等优点,近年来在垃圾处理中应用较多。等离子气化技术是一种超高温气化技术,以惰性气体形成的等离子为气化热源,可以产生2000~5000 高温<sup>[23]</sup>

。典型的等离子气化垃圾制氢的产物合成气组成为15%H<sub>2</sub>、24%CO、6%CO<sub>2</sub>和55%N<sub>2</sub><sup>[24]</sup>

。反应停留时间,等离子气体、氧化剂和蒸汽流的流速,反应温度,都会影响合成气的组成<sup>[25]</sup>。

研究成果表明,不同条件下,基于热化学技术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<sup>[26-27]</sup>

。氢气产率最高的研究来自Wu和Williams,垃圾种类为聚丙烯塑料,制氢方式为热解(500 )与气化(900 )两阶段反应,反应过程中加入了Ni-Mg-Al作为催化剂,产物氢气的浓度为41.65%,氢气产率为178.7g/kg<sup>[10]</sup>。

## 1.2生物化学技术

基于生物化学过程的垃圾制氢技术,原理是利用微生物分解垃圾中的有机物以产生氢气,典型的过程包括光发酵和暗发酵。暗发酵制氢是指在常压、缺氧、黑暗条件下,通过厌氧菌分解垃圾中的有机物产生氢气,其他产物通常为有机酸、醇、丙酮以及CO<sub>2</sub><sup>[28]</sup>

。影响氢

气产率的因素很多

,包括底物类别、底物浓度、菌株种

类、反应时间、温度、pH值、氢气分压等<sup>[29]</sup>

。由于微生物发酵施加的热力学限制,较高的底物浓度将导致较低的氢气产量。此外,过高的氢气分压对产率也有负面影响,及时移除产生的氢气有助于提高氢气产率<sup>[30]</sup>

。随着氢气分压的增加,乳酸和乙醇等其他产物的浓度增加,氢气合成减少。光发酵制氢是指在常压、厌氧、光照条件下,通过光合细菌分解垃圾中的有机物产生氢气。光转换效率、微生物菌株、垃圾类型以及反应条件共同对氢气产率施加影响。最佳的反应条

件主要取决于菌株种类，通常温度为35~37℃，pH为5~7左右<sup>[31]</sup>。生物化学制氢的能源消耗强度远低于热化学过程，但氢气产率和反应速率较低。

研究结果表明，各类市政污泥和餐厨垃圾发酵制氢的氢气产率约为8.6~174.6mL/g VS<sup>[32]</sup>。氢气产率最高的研究来自Cheng等，反应采用餐厨垃圾和污水污泥共同发酵的方式进行，有机负荷为20g VS/L，发酵温度为35℃，初始pH为6.0，总碳转化效率为63.3%，能量转化效率为56.6%，氢气产率为174.6mL/g VS<sup>[33]</sup>。

## 2垃圾制氢产业化进展

### 2.1国际垃圾制氢产业化探索实践

随着氢能重要性的提升，近年来许多企业开始探索垃圾制氢产业化。当前进入这个领域的企业主要有三类：初创企业、垃圾处理企业和氢能企业。初创企业积极性较高、布局较早，典型代表有美国Ways2H和SGH2、英国Waste2Tricity、比利时Boson Energy等。垃圾处理企业的技术实力较强、设备研发经验丰富，典型代表有英国Power House Energy等。氢能企业也越来越关注氢气来源问题，开始探索垃圾制氢，典型代表有日本氢燃料电池汽车厂商丰田、工业气体生产商及加氢站开发运营商岩谷产业、德国氢气存储公司H2-Industries等。

据本文不完全统计，全球已有16个垃圾制氢产业化项目，主要分布在欧洲、美国、日本等，详情如表1所示。从项目进展看，这些项目大都处于规划或建设阶段。美国Ways2H参与建设的东京垃圾制氢厂进展最快，已于2021年4月完成建设。从项目规模看，气化制氢项目之间差异较大，垃圾日处理能力为1~116吨不等，正向产业化迈进。从制氢方式看，多数项目选择垃圾气化直接制氢，也有的项目选择了技术难度相对较小的垃圾气化发电耦合水电解制氢。从垃圾种类看，这些项目以产氢效率较高的不可回收塑料为主。从氢气产率看，每吨垃圾的氢气产量为40~100千克。

表1 全球垃圾制氢项目

| 序<br>号 | 国家和<br>地区  | 项目方                                                                     | 技术来源                       | 技术原理         | 垃圾种类         | 产氢效率/<br>(千克氢气<br>/吨垃圾) | 进展及规模                                                                         |
|--------|------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | 英国<br>英格兰  | 英国初创企业<br>Waste2Tricity、<br>英国垃圾处理<br>技术公司Power<br>House Energy         | 英国Power<br>House<br>Energy | 气化           | 塑料           | 40                      | 2019年宣布，计划投资700万欧元建设英国首家垃圾制氢厂，日垃圾处理能力25吨，可生产1吨氢气和28 MWh电力                     |
| 2      | 英国         | 英国垃圾处理<br>技术公司Power<br>House Energy                                     | 英国Power<br>House<br>Energy | 气化           | 塑料           | 67                      | 2020年宣布将在英国境内77个地址建设垃圾制氢工厂，日垃圾处理能力30吨，可生产2吨氢气                                 |
| 3      | 美国加州       | 美国初创企业<br>Ways2H、工程<br>采购和建筑公<br>司Ford, Bacon<br>& Davis                | 美国<br>Ways2H               | 热解重整         | 城市固体<br>废弃物  | 40~50                   | 2020年宣布，于2021年开始建设，日处理能力1吨干污水污泥，可产氢气40~50千克                                   |
| 4      | 美国加州       | 日本工业气体<br>生产商及加氢<br>站开发运营<br>商岩谷产业、<br>美国初创企业                           | 美国SGH2                     | 热解重整         | 纸张           | 92                      | 2020年宣布，预计2022年动工、2023年投产，年垃圾处理能力4.2万吨，可产氢气3 850吨                             |
| 5      | 美国加州       | SGH2、州兰<br>开斯特市政府<br>美国初创企业<br>Mote、工程公<br>司Fluor、能<br>源技术供应商<br>SunGas | 美国Mote                     | 气化           | 木料           | —                       | 2021年宣布，预计2024年投产，年产氢气几千万吨，年移除二氧化碳15万吨。同时配备有碳捕捉与封存装置，预计2045年实现碳中和             |
| 6      | 日本         | 日本能源企业<br>Blue Energy                                                   | 美国<br>Ways2H               | 气化           | 污水污泥         | 40~50                   | 2020年宣布，2021年4月完成建设，日处理能力1吨干污水污泥，可产氢气40~50千克                                  |
| 7      | 东京日本       | 丰田、工业气<br>体生产商及加<br>氢站开发运营<br>商岩谷产业、<br>工程设计公司<br>JGC                   | —                          | 气化           | 塑料           | —                       | 2022年1月宣布，到2025年实现塑料垃圾制氢                                                      |
| 8      | 法国<br>马提尼克 | 马提尼克能源<br>供应商Valecom                                                    | 美国<br>Ways2H               | 气化           | 塑料和<br>家具    | —                       | 2021年签署合作意向书，建成后垃圾年处理能力9 000吨                                                 |
| 9      | 法国巴黎       | 法国环境服务<br>商SUEZ、巴黎<br>电力通信网络<br>工会SIPPEREC                              | —                          | 垃圾发电<br>耦合制氢 | 城市垃圾         | —                       | 2021年宣布，预计2022年投产，采用垃圾发电耦合水电解制氢方式，初始阶段日产氢500千克，随后攀升至1 000千克                   |
| 10     | 德国<br>巴伐利亚 | 巴伐利亚水电<br>公司                                                            | —                          | 垃圾发电<br>耦合制氢 | —            | —                       | 2021年宣布开展垃圾发电耦合水电解制氢项目，预计2022年建成                                              |
| 11     | 中国重庆       | 东方锅炉                                                                    | —                          | 气化           | —            | —                       | 2021年签署合作意向书，开展垃圾发电耦合制氢及氢能示范项目                                                |
| 12     | 中国佛山       | 瀚蓝环境                                                                    | —                          | —            | 沼气           | —                       | 2022年宣布建设餐厨垃圾制氢项目                                                             |
| 13     | 中国襄阳       | 城康氢能新<br>材料                                                             | —                          | 发酵           | 垃圾           | —                       | 2022年宣布投建绿氢绿碳工厂                                                               |
| 14     | 中国武汉       | 三环集团等                                                                   | —                          | 热解<br>—气化    | 垃圾           | —                       | 2019年签署“高环保超高温城市垃圾转化制氢油项目”合作协议                                                |
| 15     | 埃及         | 德国氢气存<br>储公司H2-<br>Industries                                           | —                          | 垃圾发电<br>耦合制氢 | 塑料和其<br>他有机物 | 75                      | 2022年2月获得埃及批准，计划在苏伊士运河经济区建设1 GW垃圾制氢厂，年垃圾处理能力400万吨，可产氢气30万吨。项目配备碳捕集利用装置，可实现碳中和 |
| 16     | 比利时<br>卢森堡 | 比利时初创企<br>业Boson Energy                                                 | 比利时<br>Boson<br>Energy     | —            | 木料           | 100                     | 预计2022年建成并投入使用                                                                |

Ways2H东京垃圾制氢厂位于东京湾附近，处理的垃圾原料为废水、污泥，设计日处理能力1吨干污泥、氢气产量40~50千克，生产

出的氢气用于附近氢燃料电池

乘用车和发电，可满足10辆氢燃料电池乘用车的日常需求<sup>[34]</sup>

。该工厂采用热解与蒸汽重整气化两阶段反应方式。在热解炉中，以氧化铝球为热载体，加热使氧化铝与污水、污泥等生物质材料接触，产生含有氢、CO、CO<sub>2</sub>

和甲烷的热解气体。随后，热解气体进入重整器，在更高温度下与水蒸汽发生反应，产生氢气分压更高的富氢气体。

英国政府已明确提出从国家层面支持垃圾制氢发展。2022年1月12日，英国政府宣布启动新的氢能生物质配备碳捕集封存创新项目，

并提供500万英镑专项资金，支持垃圾

等生物质生产清洁氢方面的研究和产业化<sup>[35]</sup>

。企业、研究机构和大学都有资格提出申请，每个项目最高可获得25万欧元支持。

## 2.2国内垃圾制氢产业化探索实践

我国是世界第一制氢大国，2019年氢气产量约3342万吨<sup>[36]</sup>

，占全球总量的37.13%。其中，煤制氢、天然气制氢、工业副产氢等方式占比分别达到63.54%、13.76%、21.18%，电解水制氢总量约50万吨，仅占1.50%。低碳、清洁的氢气尚未实现大规模供给。垃圾制氢作为一种新兴的低碳氢供给方式，也有望在我国氢能产业发展中起到重要的支撑作用。

考虑到垃圾体量和制氢效率，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。中国物资再生协会发布的报告显示，2020年中国产生塑料垃圾约6000万吨，其中回收量约为1600万吨，塑料垃圾总体回收率为26.7%。如果未被回收利用的4400万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308万吨，约为2019年我国氢气总产量的9%。文献[37]指出，2020年全国城市生活垃圾清运量为2.35亿吨，如果未来全部用于制氢，按照每吨城市生活垃圾产氢40千克计算，每年可生产氢气940万吨，约为2019年我国氢气总产量的28%。

国内企业也积极探索垃圾制氢，已成为该领域的“先行者”。2019年，三环集团等企业达成“高环保超高温城市垃圾转化制氢油项目”合作协议，项目采用纯氧燃烧、超高温气化的方式处理城市垃圾，所产生氢气可满足1000辆氢燃料电池大巴日常使用<sup>[38]</sup>

。2021年，东方锅炉与重庆市潼南区签订了垃圾发电耦合制氢及氢能示范项目合作意向书，建成后有望成为我国首个垃圾制氢产业化示范项目。进入2022年，随着“十四五”时期“无废城市”建设工作的启动，越来越多企业进入垃圾制氢领域。城康氢碳新材料宣布在湖北省襄阳市投建“垃圾制氢+碳资源化”绿氢绿碳工厂，采用城市垃圾资源化制沼气、沼气资源化制氢固碳的两阶段反应方式，设计年处理城市固废30万吨，减少碳排放35万吨，年产高纯度绿氢550吨、炭黑1650吨，预计年内建成<sup>[39]</sup>

。瀚蓝环境宣布年内将在佛山市南海区建设餐厨垃圾制氢项目，以餐厨垃圾和渗滤液产生的沼气以及绿色工业服务中心铝灰处理项目中的富氢气体作为原料气，设计年处理沼气2400吨，产氢气2200吨，减少碳排放量100万吨<sup>[40]</sup>。

## 3当前垃圾制氢技术研发及产业化面临的主要问题

### 3.1减碳仍是难题

虽然垃圾制氢的优势突

出，但不可忽视的是，垃圾中的有机物经高温气化

将产生大量CO<sub>2</sub>

。这也意味着，要让垃圾制氢变得低碳环保，碳捕集封存利用不可或缺。2021年12月，美国初创企业Mote宣布，将在2024年前建成一座利用木质废料、配备有碳捕捉与封存装置的制氢工厂，从全生命周期来看，该制氢工厂有望成为全球首个“零碳”绿氢工厂。

### 3.2能源利用效率偏低

制氢过程需要消耗能源，从能源利用的角度看，垃圾制氢效率远低于甲烷蒸汽重整、水电解等方式。研究结果表明，垃圾气化、甲烷蒸汽重

整、水电解制氢的热效率分别为35%~50%、70%~75

%和75%~80%<sup>[12,41-42]</sup>

。垃圾的种类、尺寸、形状和含水量等因素都会影响反应器效率和氢气产率，进而影响制氢能源利用效率。

### 3.3垃圾质量不达预期

我国城市生活垃圾与发达国家城市生活垃圾差异较大，厨余含量高、含水率高、热值低，对项目运行的稳定性和经济性，以及污染物的达标排放存在影响。同时，垃圾原料性质是垃圾气化反应器和系统的主要设计依据，若直接引进国外主流技术，可能出现水土不服的情况。

### 3.4气化技术有待进步

垃圾气化制氢是在垃圾气化技术上衍生出的新技术，而垃圾气化技术对产业技术基础要求较高。国外对垃圾气化技术的研究起步比较早，在热分选气化技术和等离子体气化技术等领域有较多积累，已研发出工业级技术设备。例如，美国西屋等离子体公司在20世纪90年代就取得较大进展，并于2003年在日本建设了220吨/天的用于处理生活垃圾和汽车废渣的等离子体气化工厂，产物合成气用于发电<sup>[43-44]</sup>。然而，我国等离子体气化技术直到2018年才进入工程应用阶段。

## 4对我国垃圾制氢技术研发及产业化的几点建议

### 4.1支持垃圾制氢技术装备研发

推动工业级垃圾气化制氢技术装备研发，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，扩大垃圾适用范围。改进氢气分离提纯工艺，适应垃圾生产过程中存在的氢气浓度偏低、杂质复杂等问题。加强生物化学类垃圾制氢技术创新，研究利用有机废物的厌氧消化、无氧发酵等方式制氢，开发出低能耗、低排放、高效率的新型垃圾制氢技术。

### 4.2推动垃圾制氢项目试点示范

开展垃圾气化制氢项目试点工作，研发建立垃圾预处理、垃圾气化、合成气清洗、氢气分离提纯等全过程工程技术能力，优化提高设备运行效率，不断降低氢气生产成本。支持垃圾气化发电耦合水电解制氢产业化示范运营，通过长期应用积累实践经验，提高我国垃圾气化技术水平，探索垃圾制氢商业模式。

### 4.3持续推进垃圾分类工作

完善垃圾分类法律法规制度体系，因地制宜基本建成生活垃圾分类投放、分类收集、分类运输、分类处理系统。通过有效的垃圾收集与分类，提高垃圾热值、减少原料特性的不确定性、降低废物原料的异质性，保障垃圾制氢运行稳定，降低预处理成本和合成气清洗成本。

### 4.4强化碳捕集封存利用技术创新

推动碳捕集封存利用技术与垃圾制氢技术融合发展，研发适用于垃圾制氢的先进碳捕集封存利用技术，降低垃圾制氢的碳排放强度。加速推动投融资，支持碳捕集封存利用技术产业化，将碳捕集封存利用技术纳入产业和技术发展目录。打通金融融资渠道，提供优先授信和优惠贷款，探索利用碳市场机制支持碳捕集封存利用技术发展的政策。

## 参考文献

[1]IEA. Net Zero by 2050: A Roadmap for the GlobalEnergy Sector[EB/OL]. (2021-05). <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.

[2]IEA. The Future of Hydrogen[EB/OL]. (2019-07).<http://www.iea.org.reports/the-future-of-hydrogen>.

[3]IEA. Global Hydrogen Review 2021[EB/OL]. (2021-10). <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.

[4]GUAN Y, SHAN Y, HUANG Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. Earth's Future.2021, 9(11): 2021EF002241.

- [5]IRENA. Hydrogen from Renewable Power[EB/OL].(2021-09). <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>.
- [6]仲蕊. 垃圾制氢前景可期[N]. 中国能源报, 2021-09-27(9).
- [7]中国电动汽车百人会. 中国氢能产业发展报告(2020)[EB/OL]. (2020-10). [http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN\\_RES/INDUS/2020/10/22/73726abb-c2db-4c81-b0d7-1f6aa3c36707.pdf](http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2020/10/22/73726abb-c2db-4c81-b0d7-1f6aa3c36707.pdf).
- [8]LOMBARDI L, CARNEVALE E, CORTI A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste[J]. Waste Management, 2015, 37(3): 26-44.
- [9]ZANZI R, SJÖSTRÖM K, BJÖRNBOM E. Rapid high-temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor[J]. Fuel, 1996, 75(5): 545-550.
- [10]WU C, WILLIAMS P T. Hydrogen from waste plastics by way of pyrolysis – gasification[J]. Proceedings of the ICE: Waste and Resource Management, 2014, 167(1):35-46.
- [11]CAMPOY M, GÓMEZ-BAREA A, OLLERO P, et al. Gasification of wastes in a pilot fluidized bed gasifier[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 121(5): 63-69.
- [12]ARREGI A, AMUTIO M, LOPEZ G, et al. Evaluation of thermochemical routes for hydrogen production from biomass: A review[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 165(6): 696-719.
- [13]NIKOLAIDIS P, POULLIKKAS A. A comparative overview of hydrogen production processes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67(1): 597-611.
- [14]CHUTICHAIB, AUTHAYANUNS, ASSABUMRUNGRAT S, et al. Performance analysis of an integrated biomass gasification and PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) system: Hydrogen and power generation[J]. Energy, 2013, 55(6): 98-106.
- [15]IRIBARREN D, SUSMOZAS A, PETRAKOPOULOU, et al. Environmental and exergetic evaluation of hydrogen production via lignocellulosic biomass gasification[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 69(4): 165-175.
- [16]BEHESHTI S M, GHASSEMI H, SHAHSAVAN-MARKADEH R. Process simulation of biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 94(4): 345-352.
- [17]PARTHASARATHY P, NARAYANAN K S. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield: A review[J]. Renewable Energy, 2014, 66(6):570-579.
- [18]HE M, BO X, HU Z, et al. Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(3):1342-1348.
- [19]MA Z, XIAO R, ZHANG H. Catalytic steam reforming of bio-oil model compounds for hydrogen-rich gas production using bio-char as catalyst[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 42(6): 3579-3585.
- [20]王晶博, 张静, 钱益斌, 等. CaO对城市生活垃圾原位水蒸气气化制备富氢燃气的影响[J]. 2014, 27(3): 279-286.
- [21]WATSON J, ZHANG Y, SI B, et al. Gasification of biowaste: A critical review and outlooks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 83(3): 1-17.
- [22]AL-RAHBI A S, WILLIAMS P T. Hydrogen-rich syngas production and tar removal from biomass gasification using sacrificial tyre pyrolysis char[J]. Applied Energy, 2017, 190(5): 501-509.
- [23]OUDA O, RAZA S A. Waste-to-energy: Solution for Municipal Solid Waste challenges- global perspective[C]// 2014 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET 2014). IEEE, 2014.

- [24]TAVARES J R, RAO L, DERBOGHOSSIAN C, et al. Large-Scale Plasma Waste Gasification[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 2908-2909.
- [25]MUNIR M T, MARDON I, AL-ZUHAIR S, et al. Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 116(12): 109461.
- [26]王博, 宋永一, 王鑫, 等. 有机固体废弃物热化学制氢研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(2): 709-721.
- [27]LUI J, CHEN W H, DAN T, et al. A critical review on the principles, applications, and challenges of waste-to-hydrogen technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110365.
- [28]WANG G, LI Q, DZAKPASU M, et al. Impacts of different biochar types on hydrogen production promotion during fermentative co-digestion of food wastes and dewatered sewage sludge[J]. Waste Management, 2018, 80(10): 73-80.
- [29]LUKAJTIS R, HOLOWACZ I, KUCHARSKA K, et al. Hydrogen production from biomass using dark fermentation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 91(8): 665-694.
- [30]KUMAR G, SHOBANA S, NAGARAJAN D, et al. Biomass based hydrogen production by dark fermentation-recent trends and opportunities for greener processes[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2018,50(4): 136-145.
- [31]BICAKOVA O, STRAKA P. Production of Hydrogen from Renewable Resources[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(16): 11563-11578.
- [32]陈宏, 吴军, 陈晨, 等. 有机废弃物厌氧共发酵制氢研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(1): 440-450.
- [33]CHENG J, DING L, LIN R, et al. Fermentative biohydrogen and biomethane co-production from mixture of food waste and sewage sludge: Effects of physiochemical properties and mix ratios on fermentation performance[J]. Applied Energy, 2016, 184(12): 1-8.
- [34]Ways2H Inc. Ways2H Japan blue energy launch Tokyo renewable H<sub>2</sub> production site[EB/OL]. (2021-03-30). <https://ways2h.com/ways2h-japan-blue-energy-launch-tokyo-renewable-h2-production-site/>.
- [35]United Kingdom Government. Government launches new scheme for technologies producing hydrogen from biomass[EB/OL]. (2022-01-12). <https://www.gov.uk/government/news/government-launches-new-scheme-for-technologies-producing-hydrogen-from-biomass>.
- [36]中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书2020[EB/OL]. (2021-04-21). [https://yhp-website.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/upload/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E6%B0%A2%E8%83%BD%E6%BA%90%E5%8F%8A%E7%87%83%E6%96%99%E7%94%B5%E6%B1%A0%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A62020%E8%8A%82%E9%80%89\\_1632066740739.pdf](https://yhp-website.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/upload/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E6%B0%A2%E8%83%BD%E6%BA%90%E5%8F%8A%E7%87%83%E6%96%99%E7%94%B5%E6%B1%A0%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A62020%E8%8A%82%E9%80%89_1632066740739.pdf).
- [37]中国人大网. 全国人民代表大会常务委员会执法检查组关于检查《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》实施情况的报告[EB/OL]. (2019-10-25). <http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/202110/20dcb8233e69453a988eb86a281a2db1.shtml>.
- [38]刘天纵. 垃圾制氢项目落地武汉, 一吨固废可制取氢气450立方米[N/OL]. 湖北日报. (2019-09-06). [http://hb.china.com.cn/2019-09/06/content\\_40886854.htm](http://hb.china.com.cn/2019-09/06/content_40886854.htm).
- [39]北极星氢能网. 全球首个“垃圾制氢+碳资源化”绿氢绿炭工厂落地襄阳[EB/OL]. (2022-04-06). <https://news.bjx.com.cn/html/20220406/1215507.shtml>.
- [40]程晖. “固废+能源”协同制氢, 瀚蓝环境打造氢气制、加、用一体化示范模式[N/OL]. 中国经济导报. (2022-03-10). <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2022-03-10/doc-imcwipih7662894.shtml>.
- [41]JU H, BADWAL S, GIDDEY S. A comprehensive review of carbon and hydrocarbon assisted water electrolysis for hydrogen

production[J]. Applied Energy, 2018, 231(12):502-533.

[42]CHISHOLM G, CRONIN L. Hydrogen From Water Electrolysis[J]. Storing Energy, 2016: 315-343.

[43]王希, 张春飞, 谢斐. 垃圾等离子气化：机遇，挑战和对策[J]. 东方电气评论, 2014, 28(4): 22-29.

[44]梁永煌, 魏涛. 垃圾气化技术的应用现状及发展趋势[J]. 中国环保产业, 2016(3): 47-54.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/186735.html>