

# Hydrogen Production Pathway via Biomass Gasification Coupled with Plasma Pyrolysis for Agricultural Waste Treatment

Tao Feng<sup>1</sup> Hui Liao<sup>2</sup>

1. Wuhan Zhongmao Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430064, China  
2. Wuhan Zhongcheng Anhuan Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

With the increasingly severe global energy crisis and environmental pollution, the development of clean and renewable hydrogen energy has become a research hotspot. Agricultural waste generates massive quantities, and its efficient and clean conversion is of great significance for sustainable development. This paper explores a treatment pathway that combines traditional biomass gasification with advanced plasma pyrolysis technology for the efficient production of hydrogen from agricultural waste. Analysis shows that this coupled technology can effectively overcome the issues of high tar content and low hydrogen yield associated with conventional gasification techniques, achieving thorough resource utilization and harmless treatment of agricultural waste. It provides a highly promising technical route for the large-scale production of green hydrogen.

## Keywords

agricultural waste; biomass gasification; plasma pyrolysis; hydrogen production; syngas

# 生物质气化耦合等离子体裂解技术处理农业废弃物产氢路径

冯涛<sup>1</sup> 廖慧<sup>2</sup>

1. 武汉仲茂环境科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430064  
2. 武汉众诚安环科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

随着全球能源危机与环境污染问题日益严峻, 开发清洁、可再生的氢能已成为研究热点。农业废弃物产生量巨大, 其高效、清洁转化对于可持续发展具有重要意义。本文探讨了一种将传统生物质气化与先进等离子体裂解技术相耦合的处理路径, 用于从农业废弃物中高效制取氢气。分析表明, 该耦合技术能够有效克服传统气化技术产生的焦油含量高、氢气产率低等问题, 实现对农业废弃物的彻底资源化与无害化处理, 为绿色氢能的规模化生产提供了一条极具潜力的技术路线。

## 关键词

农业废弃物; 生物质气化; 等离子体裂解; 制氢; 合成气

## 1 引言

农业废弃物属于重要的生物质资源, 采用焚烧或简单堆肥的传统处理方式, 不但造成资源浪费, 更引发严重的大气污染以及温室气体排放。把它转化为高附加值的清洁能源氢气, 是实现“变废为宝”及“碳减排”双重目标的关键举措。生物质气化属于规模化处理固体废弃物的主流技术之一, 但传统气化技术合成气中焦油含量颇高, 不仅降低气化效率, 还容易造成设备堵塞与腐蚀, 同时影响氢气纯度和产率。为攻克这些瓶颈, 把热效率高、反应剧烈的等离子体技术引入

后处理这一环节, 构建生物质气化耦合等离子体裂解的创新工艺, 可以实现对焦油等副产物的深度裂解及重整, 有效提升氢气产量及品质。本文旨在系统梳理该耦合技术的产氢途径, 剖析此项技术内涵, 为相关技术研发及应用给予理论参照。

## 2 农业废弃物预处理与生物质气化过程

把农业废弃物当作气化原料, 其特性和预处理方式直接影响后续气化效果与合成气品质, 本环节是整条技术路径起始及基础部分。

### 2.1 农业废弃物原料特性与预处理

农业废弃物比如秸秆、稻壳、果木枝条等普遍呈现含水量高(通常达30%~60%)、堆积密度低、氧含量较高、碱金属元素丰富等特征, 造成其直接气化效率较低。预处理

【作者简介】冯涛(1988-), 男, 中国湖北咸宁人, 本科, 工程师, 从事环境规划与管理、环境监测、固废处置及利用、生态修复、碳排放管理研究。

环节极为关键，经自然晾晒或机械烘干可显著降低含水率，防止气化时过多热量被水分蒸发消耗。破碎及筛分能控制物料粒径分布，增进流动性，预防架桥与堵塞，为后续气化筑牢稳定进料根基。良好的预处理不仅可提升气化反应速率，也对提高合成气有效成分有帮助，是实现农业废弃物高效能源化利用的关键基础。

## 2.2 生物质气化基本原理与技术

生物质气化是把固体生物质置于高温缺氧环境，通过一系列热化学反应使之转化为富含 CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等可燃合成气的过程。该过程一般包含干燥、热解、氧化与还原四个阶段，各阶段相互交融，共同决定合成气组成与品质，当下主流气化炉型涵盖固定床与流化床两类<sup>[1]</sup>。其中流化床气化炉具备物料混合充分、温度分布均匀、适应不同原料等特性，在处理成分繁杂、形态多样的农业废弃物时呈现出更强适应性，适合进行规模化连续运行，是实现农业废弃物高效气化的主流技术路径。

## 2.3 气化产物中焦油问题的产生

在生物质气化进程中，由于热解不充分及二次反应不完全，会生成一连串重质烃类副产物，合称为焦油。焦油在温度低于露点时凝结成黏稠液体，易于附着于下游设备的内壁，引发滤网、管道、燃气轮机等的堵塞与腐蚀，极大影响系统的稳定运行。其存在不仅降低气化效率，还造成后续净化成本上升，成为气化技术商业化应用的关键制约瓶颈。传统气化工艺对焦油的控制能力欠佳，所产合成气中氢气体积分数大多在 30%–50% 区间，整体品质和能源利用率仍需进一步提高，急需研发高效经济的焦油脱除技术。

# 3 合成气净化与等离子体重整关键环节

粗合成气由气化炉产出，含有粉尘、焦油及多种杂质气体，需经过净化与重整，才能为后续深度制氢提供合乎标准的原料气。本环节是维持系统稳定运行及提升效率的关键。

## 3.1 合成气的初步净化处理

粗合成气首先必须经过“布袋除尘器”等高效的干式处理方法去除大部分固体粉尘，依靠洗涤塔等湿法净化装置，还能进一步去除细颗粒物并冷却气体。此过程能部分溶解及去除一些可溶性气体杂质，比如氯化氢和氨气，但针对不溶于水的高分子焦油，去除效果欠佳，且会产生含有焦油的废水，产生二次污染隐患。

## 3.2 等离子体技术及其对焦油的裂解作用

等离子体作为物质第四态，由高度电离的气体所组成，内部富含电子、离子、活性基团等各类活性粒子，热等离子体炬可产生数千摄氏度高温，给焦油裂解提供强大能量<sup>[2]</sup>。当含有焦油的合成气历经等离子体反应区时，在极高温度和活性粒子轰击下的焦油大分子，化学键瞬间断裂，95% 以上裂解为小分子的 CO 和 H<sub>2</sub>，进而消除了 95% 以上焦油危害，且同步致使合成气中有效成分的含量增加。

## 3.3 烃类物质的水蒸气重整反应

合成气中一般还含有一定量的 CH<sub>4</sub> 及其他轻质烃类，往等离子体反应器中引入适量水蒸气，可借助等离子体产生的高温，引发且加速水蒸气重整反应。以 CH<sub>4</sub> 为例，该反应的化学方程式是  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ ，此为强吸热反应，能够把烃类物质高效转化为 H<sub>2</sub> 与 CO，进而大幅提高最终产物中的氢气产量。

# 4 富氢合成气的纯化与产氢路径分析

经等离子体重整的合成气，其氢气含量大幅提升，已然成为富氢合成气。若要获取高纯度的氢气产品，还需完成最后的分离与纯化环节，并对其整体技术路径进行考量。

## 4.1 富氢合成气的组成与特征

通过等离子体裂解与水蒸气重整联合工艺处理后，生物质气化所产出的粗合成气出现了显著的品质提升与组分重构。这一过程的关键意义是，借助等离子体炬营造的高温高活性环境，将粗合成气中难以处理的重质焦油分子完全裂解为小分子的永久性气体；紧接着的水蒸气重整阶段，进而进一步推动了轻质碳氢化合物与蒸汽的反应。其显著的产物特性，使困扰传统气化技术的焦油问题，出口气体中的焦油含量降至极低水准，在诸多优化工况下甚至能达到仪器难以检测的微含量。

在彻底去除焦油时，该工艺极大地优化了有效气体的组成。通过上述反应路径，原本构成焦油及部分轻烃的碳氢元素被充分转化为一氧化碳与氢气，让合成气中 CO 和 H<sub>2</sub> 的总体积分数大幅跃升，一般可以稳定在 80% 以上<sup>[3]</sup>。特别值得注意的是，对于水蒸气重整反应而言，反应中有水分子参与，直接增添了额外的氢元素，这让合成气中的氢气比例获得针对性提升，在诸多情形下可占据总有效气体的 50% 乃至更高比例，极大地增强了合成气的还原价值及作为氢源的品质。

二氧化碳作为碳基燃料气化过程中化学平衡的必然产物，在此工艺下依旧是合成气内的主要杂质成分，尽管其浓度与传统气化相比有所变化，但依然留存。深度净化与改质后的合成气，其气体组成已经变得极为简洁、优质：以高浓度的 CO 以及 H<sub>2</sub> 为主，增添一定量的 CO<sub>2</sub>，并基本排除了焦油的危害。高度纯净且富氢的气体组成，使其完全拥有了作为下游高效制氢工艺（如变压吸附或膜分离）理想原料气的坚实基础，为生物质能高价值、低碳利用开拓了路径。

## 4.2 氢气分离与纯化技术选择

对经过深度净化与改质的富氢合成气进行高效氢气分离与提纯，是整个生物质基产氢路径的关键及最终步骤。此步骤的目标是获取满足下游应用（如燃料电池、化工合成）所需的高纯度氢气产品。为实现这一目的，工业上已形成多种成熟的分离技术，主要涉及基于物理性质差异的变压吸附、膜分离，以及依据沸点差异的低温分离等。每种技术各自有着适用的工况、经济性及产品规格要求，需根据合成气

的具体组成、处理规模以及目标产品纯度做综合比选。

在众多技术方案中,变压吸附技术凭借其在特定应用场景中呈现出的综合优势,在该类耦合产氢路径中最常被纳入评估并选用。PSA技术的核心优势是其产品纯度极高,能够稳定产出纯度达99.99%的氢气,完全能够契合最为苛刻的工业与能源应用标准。该技术工艺流程自动化程度颇高,可实现不间断、稳定的无人操作,运行可靠性高,并且其在化工领域有数十年的广泛应用。技术本身已十分成熟,设备制造、工艺设计及运行经验均极为丰富,投资及运营的风险相对较为可控。

变压吸附技术实现气体分离的物理依据,是通过特定吸附剂材料(如活性氧化铝、分子筛等)对不同气体组分在不同压力下吸附容量的明显差异来达成的<sup>[4]</sup>。在一个典型的PSA循环之中,富含氢气的合成气于较高压力下经装有吸附剂的塔器,其中存在的杂质组分,比如二氧化碳、一氧化碳、甲烷以及可能残留的微量水分,因其吸附能力比氢气更强,被选择性地吸附在吸附剂孔道中。而氢气分子因极难被吸附,便得以穿过吸附床层,被当作高纯度的产品气收集。通过降低塔内压力,被吸附的杂质得以实现解吸释放,吸附剂实现再生,从而循环运作地实现氢气与杂质气体的高效、连续分离,最终完成富氢合成气至高纯氢气的提质进程。

#### 4.3 耦合技术产氢路径的整体能效与环境效益

该制氢路径——生物质等离子体耦合,本质上属于一种集成创新策略。它把生物质气化技术的规模化处理能力与等离子体技术的深度裂解、高效转化优势精妙地融为一体,构成了一个逻辑严密、环节衔接紧凑的完整产氢链条。其典型流程可表述为“生物质预处理—气化生成粗合成气—初步净化—等离子体裂解与水蒸气重整—最终氢气分离提纯”,链条之中的每一环节都承担特定职责,前序环节为后续环节做好铺垫,共同保障了从成分复杂的固体生物质到高纯度氢气产品的平稳转化。

在能源效率上,该路径的核心价值在于最大限度提取并转化储存在农业废弃物中的化学能。通过气化与深度重整,高效地把生物质中的碳氢元素转化为富含氢气的合成气,最终借由分离得到洁净的氢能。最为关键的是,系统具备不错的内部能量整合潜力:可以用一部分自产的合成气驱

动燃气轮机或内燃机发电,所产生的电能可直接给耗能较高的等离子体炬提供动力支持。这种能量循环利用模式,大幅减少了对外部电网的依赖,提升了系统的能量支持水平,进而整体上提升了全链条的能源经济性。

在环境效益上,该技术路径体现出多重优势,它达成了农业废弃物的全量资源化及无害化处理,把秸秆等废弃物转变为高价值能源。该过程中不会产生有害的焦油副产物以及需要特殊处置的废渣,从根本上化解了传统焚烧或废弃带来的环境污染问题<sup>[5]</sup>。整个转化过程从本质上讲是碳中性的,即便气化与燃烧过程会释放二氧化碳,但这些二氧化碳出自生物质生长过程中借光合作用从大气中吸收的碳,其生命周期的净碳排放量接近零值,没有额外增添大气中的温室气体负荷量。该路径不仅给出了一条清洁的氢能获取渠道,也为解决农业面源污染及应对气候变化提供了具有积极贡献的技术方案。

## 5 结语

生物质气化与等离子体裂解耦合技术,为农业废弃物资源化利用与高纯度氢气制备构建了一条创新且高效的技术路线。该路径通过生物质气化完成废弃物的初步能源转化,再依靠等离子体技术强大的裂解与重整能力,彻底攻克了焦油难题,且显著提升了氢气的产率。最终借助成熟的纯化技术得到高纯氢产品,整个流程思维周全,不仅高效利用了废弃生物质资源,又生产出清洁的氢能,既有着良好的经济效益又有环境效益,呈现出广阔的产业化应用前景,是推进循环经济及氢能社会建设的有力技术候选之一。

## 参考文献

- [1] 徐彬,李嘉卿,谢建军,等.等离子体耦合催化焦油脱除同时生物质燃气甲烷化性能研究[J].燃料化学学报,2021,49(7):11.
- [2] 肖陆飞,哈云,孟飞,等.生物质气化技术研究与应用进展[J].现代化工,2020(012):040.
- [3] 杜长明,吴焦,黄娅妮.等离子体热解气化有机废弃物制氢的关键技术分析[J].中国环境科学,2016,36(11):12.
- [4] 徐彬,谢建军,袁洪友,等.填充床介质阻挡放电脱除气化燃气中苯的研究[J].燃料化学学报,2019(4):11
- [5] 陈霖,时亚琴,梅丹华,等.不同气体成分添加对氮气滑动弧放电模式及特性的影响[J].高电压技术,2022,48(9):3794-3803.