中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 8 期: 2045 ~ 2048
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
精选文章导读

# 基于直接辐射式反应器的太阳能驱动生物质催化气化特性实验研究

白章[1], 王硕硕[1], 刘启斌[2,3*], 黄贤坤[1], 朱晓丽[1], 焦钒[2,3], 巩亮[1]

1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 青岛 266580
2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190
3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049
* E-mail: qibinliu@mail.etp.ac.cn

## 1 研究背景

大力开发利用可再生能源是推动能源结构清洁低碳转型的关键举措, 对于碳减排和能源保障具有重要意义. 其中, 太阳能与生物质能资源量丰富、分布广泛, 将成为未来能源体系的重要组成部分[1,2]. 除了光伏、生物质燃烧发电等单一能源利用形式, 太阳能驱动生物质气化技术将高温太阳能聚光集热与生物质气化反应耦合, 将有助于实现太阳能与生物质的高效互补开发利用, 现已成为当前能源研究的重点领域和前沿方向[3,4].

与传统生物质自热气化相比, 聚光太阳能驱动气化由于采用外部供热方式, 将显著降低生物质原料的原位氧化损耗、提升合成气产率, 并实现将太阳能以燃料化学能形式稳定储存, 便于后续灵活调用[5,6]. 然而, 由于太阳能辐照的动态波动和生物质原料组分多样性等特征, 使得太阳能驱动生物质气化的反应特性复杂且部分工况转化率提升严重受限, 因此进一步强化太阳能气化的反应转化过程以提升过程能效, 对于推动该技术的高质量发展至关重要.

生物质气化作为复杂的热化学反应过程, 通过催化气化等方式有助于降低反应活化能、提升气化合成气产率[7,8], 常见生物质气化催化剂包括天然矿石、碱及碱土金属以及过渡金属等体系[9,10]. 然而, 针对太阳能驱动工况下的气化催化规律尚不明晰, 尤其在直接辐射式太阳能驱动生物质气化技术体系中, 催化反应过程将面临高通量辐照、能量分布不均、瞬态快速升温等复杂特征, 以及氧化阶段缺失的非常规反应路径, 催化剂性能面临新的挑战. 因此, 亟需通过建立太阳能直接辐射气化实验系统, 实测评估太阳直接辐照气化反应的催化提升作用与气化产物调控规律, 为发展高效的太阳能催化气化技术提供科学支撑.

## 2 本文工作

本文围绕太阳能驱动生物质催化气化开展了深入实验研究, 探究太阳能直接辐照工况下的生物质催化气化反应特性. 为支撑可控太阳能气化实验, 研发了以高通量太阳能模拟器(high flux solar simulator, HFSS)和直接辐射式固定床反应器为核心的实验平台, 如图1所示, 进一步结合辅助设备形成了完整的实验系统, 包括进气、反应、净化、分析等部分, 如图2所示.

实验以破碎后的粉末状小麦秸秆为气化原料, 置于反应器内, 并利用蒸汽发生器与质量流量计实现水蒸气和氮气的连续稳定供应; 透过石英窗的聚光辐射

英文全文见: Bai Z, Wang S S, Liu Q B, et al. Experimental study on solar-driven biomass catalytic gasification characteristics in the direct radiative reactor. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1900104, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2817-7

© 2026《中国科学》杂志社

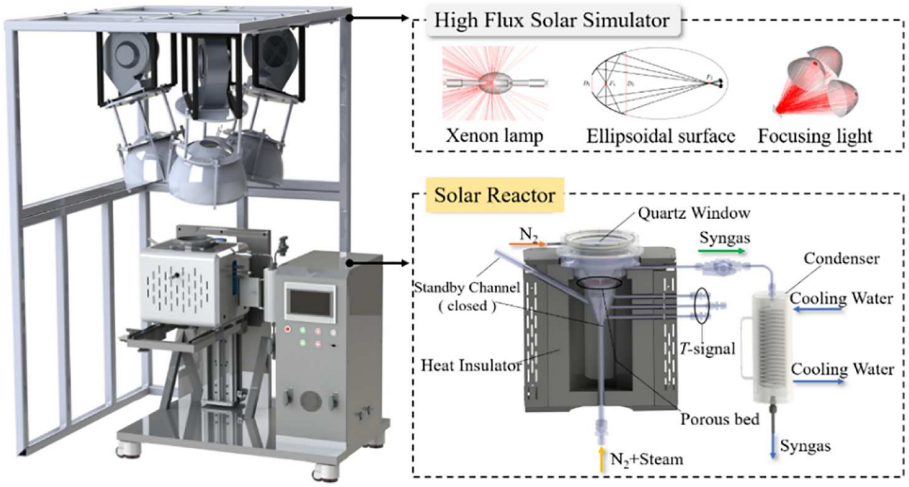



**图 1** (网络版彩图)高能流太阳能模拟器与太阳能反应器结构
**Figure 1** (Color online) The high flux solar simulator (HFSS) and solar reactor structure.

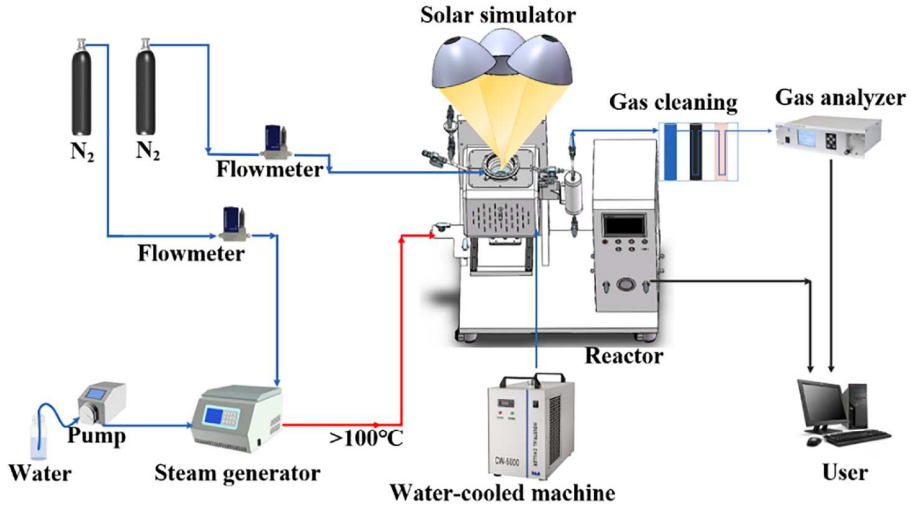



**图 2** (网络版彩图)实验系统总布置示意图
**Figure 2** (Color online) Schematics of the overall experimental setup.

使反应床快速升温, 并以水蒸气为气化剂, 在惰性气氛下实现原料的热化学转化并生成富氢合成气; 气化产气经过水洗和活性炭以净化焦油、水汽, 并通过在线气体分析仪实时测定气体的动态变化. 此外, 辐射光斑的能流密度分布是太阳能聚光系统的核心参数, 直接决定了气化过程中的反应温度、升温速率以及辐射传热效果, 本文采用间接测量法来获取并评价辐射能流密度的空间分布特性. 在反应床上也将布置温度测点, 所得温度数据作为监测反应腔内工况的关键指标, 实验温度测试结果如图3所示.

为广泛探究催化剂对太阳能直接辐射气化反应的影响特性, 实验选用$CaMg(CO_3)_2$, $Na_2CO_3$, $Fe_2O_3$, CaO等多类型催化剂进行气化实验对比分析, 生物质与催化剂均为粉末形态并充分混合. 富氢合成气是太阳能气化反应的主要目标产物和能量载体形式, 产气结果通过在线气体分析仪实时检测. 产气结果分析中也针对气体产量、组分分布、能量提升等方面进行系统对比, 引入$H_2$/CO摩尔比和能量提升因子两项指标, 分别

衡量产气的化工合成潜力与转化能效. 此外, 为揭示催化剂的工况适应性与稳定性, 收集的固体残渣通过XRD与SEM测试以评估晶相组成和形貌特征.

选用的多类型催化剂均能提高太阳能气化合成气产率, 其中$CaMg(CO_3)_2$催化气化的产气量最大. 然而, 不同类型催化剂对气化产气的组分分布也有着显著影响, 如图4(a)所示, CaO催化气化产气中的$H_2$组分比例提升最为显著, 达到49.50%, 对应的$H_2$/CO摩尔比为1.3; $CaMg(CO_3)_2$则大幅提升了CO产量, $H_2$占比较低. 从能量转化的角度分析, 催化气化均优于非催化气化反应工况, 能量提升因子均得以提高, 如图4(b)所示, $CaMg(CO_3)_2$催化气化的能量提升因子增幅最大. 此外, 通过催化剂和残余固相的晶相与表面形貌表征分析, 表明部分催化剂存在晶相不稳定现象, CaO部分转化为$CaCO_3$, $Fe_2O_3$被还原为FeO与$Fe_3O_4$混合相, 相关催化剂的循环稳定性还需进一步验证.

## 3　主要研究结论

为探究太阳能直接辐射工况下的生物质催化气化反应特性, 研制了太阳能气化实验平台, 并结合多类型催化剂开展深入实验研究.

(1) 研制的直接辐射气化实验平台可提供约1170 kW/m$^2$的平均太阳辐射能流密度, 床层温度可迅速达到1260°C, 能为生物质气化提供良好的反应条件.

(2) 各类催化剂在直接辐射工况下表现出了差异化的气化产气组分调节作用, 其中CaO使气化产气的$H_2$占比显著提升至49.50%.

(3) 相对于无催化工况, 催化气化均强化了太阳能气化的产气率, 产气量最高提升了21.98%, 对应的能量提升因子达到1.08.

本研究深入探究了基于多类型催化剂的太阳能气化反应特性, 将为后续开发太阳能高效气化方法与技术研究提供重要支撑.

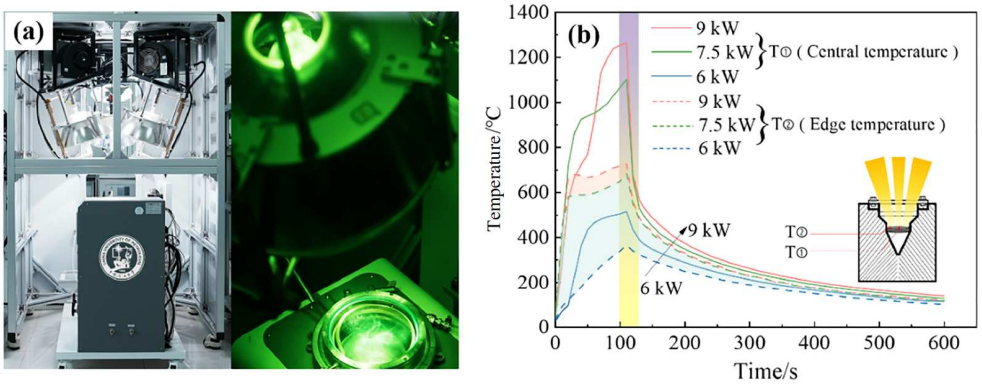



**图 3**　(网络版彩图) (a) 聚光辐射下气化反应器; (b) 太阳能气化中的反应器温度测试结果
**Figure 3**　(Color online) (a) Reactor under focus irradiation; (b) solar reactor temperature test.

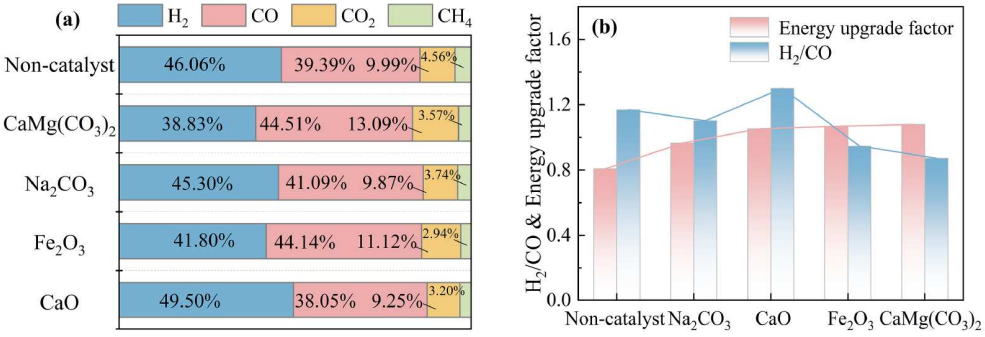



**图 4**　(网络版彩图) (a) 各催化气化工况的产气组分比例; (b) 各催化气化反应工况的$H_2$/CO与能量提升因子
**Figure 4**　(Color online) (a) The proportion of the syngas component; (b) the $H_2$/CO ratio and energy upgrade under different catalyst reaction conditions.

## 参考文献


1 Wu H F, Zhang B W, Qu W J, et al. Integration of a thermochemical energy system driven by solar energy and biomass for natural gas and power production. Sci China Tech Sci, 2022, 65: 1383–1395

2 Dai T, Xu C, Zhang Q, et al. Experimental study of the solar-driven steam gasification of coal in an improved updraft combined drop-tube and fixed-bed reactor. Energy Convers Manage, 2022, 259: 115571

3 Freda C, Tarquini P, Sharma V K, et al. Thermodynamic improvement of solar driven gasification compared to conventional one. Energy, 2022, 261: 124953

4 Hussain C M I, Norton B, Duffy A. Comparison of hybridizing options for solar heat, biomass and heat storage for electricity generation in Spain. Energy Convers Manage, 2020, 222: 113231

5 Xu D, Wang B, Li X, et al. Solar-driven biomass chemical looping gasification using $Fe_3O_4$ for syngas and high-purity hydrogen production. Chem Eng J, 2024, 479: 147901

6 Bai Z, Hu W, Zhu X, et al. Solar-driven biomass steam gasification by new concept of solar particles heat carrier with CPFD simulation. Energy Convers Manage, 2023, 293: 117500

7 Ren J, Liu Y L, Zhao X Y, et al. Biomass thermochemical conversion: A review on tar elimination from biomass catalytic gasification. J Energy Institute, 2020, 93: 1083–1098

8 Hathaway B J, Davidson J H. Solar steam gasification of cellulose in a molten alkali salt: Salt chemistry and reactor performance. Energy Fuels, 2020, 34: 1811–1821

9 Niu Y, Chi Z, Li M, et al. Advancements in biomass gasification and catalytic tar-cracking technologies. Mater Rep-Energy, 2024, 4: 100295

10 Wu L, Yan Z, Xie J, et al. Enhancing the catalytic $H_2$ production performance of magnetic Ni-$Fe_2O_3$-C catalyst in biomass steam gasification using electromagnetic induction heating. Bioresource Tech, 2024, 402: 130844