

# 棉秆与聚乙烯的化学链共气化研究

孙思盈, 张骁鹞, 蔡金津, 江文涛, 张文婧, 亚力昆江·吐尔逊\*

(新疆大学化工学院, 新疆煤炭清洁转化与化工过程重点实验室,  
省部共建碳基能源资源化学与利用国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 化学链气化技术在生物质及固废利用中展现出广阔前景。采用两段式固定床反应器, 研究棉秆与聚乙烯在载镍铁矿石作用下的化学链共气化, 考察 NiO 负载量、气化温度、载氧体与燃料质量比及水蒸气添加对气体产率、组分和焦油含量的影响。结果表明: 在 5% NiO、800℃ 时, 总气体产率为 0.97 Nm<sup>3</sup>/kg; 当载氧体与燃料质量比升至 30、水蒸气流量为 0.03 g/min 时, 产率增至 1.22 Nm<sup>3</sup>/kg, H<sub>2</sub> 和 CO 分别占 39.66% 和 32.07%。载氧体逐步被还原为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Fe-Ni。水蒸气使晶格氧利用率由 59.02% 降至 25.48%。

**关键词:** 化学链共气化; 棉秆; 聚乙烯; 铁矿石

中图分类号: X705; TQ54

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0162-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.028

## Study on the chemical looping gasification of cotton stalks and polyethylene

SUN Si-ying, ZHANG Xiao-li, CAI Jin-jin, JIANG Wen-tao, ZHANG Wen-jing, YAKUNJAN Tursun\*

(Xinjiang Key Laboratory of Coal Clean Conversion & Chemical Engineering Process, State Key Laboratory of Chemistry and Utilization of Carbon Based Energy Resources, School of Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** Chemical looping gasification technology shows great potential in biomass and solid waste utilization. A two-stage fixed-bed reactor was employed to study the co-gasification of cotton stalks and polyethylene using nickel-loaded iron ore as the carrier. The effects of NiO loading, gasification temperature, oxygen carrier-to-fuel mass ratio, and steam addition on gas yield, composition, and tar content were investigated. Results indicate that at 5% NiO loading and 800℃, the total gas yield reaches 0.97 Nm<sup>3</sup>/kg. When the oxygen carrier-to-fuel mass ratio increases to 30 and steam flow rate rises to 0.03 g/min, the yield increases to 1.22 Nm<sup>3</sup>/kg, with H<sub>2</sub> and CO constituting 39.66% and 32.07%, respectively. The oxygen carrier was progressively reduced to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe-Ni. Steam reduced lattice oxygen utilization from 59.02% to 25.48%.

**Key words:** chemical looping co-gasification; cotton stalks; polyethylene; iron ore

随着我国社会经济持续发展, 生产和生活过程中产生的有机固体废物不断增加, 农林废弃生物质在其中占有很大比重<sup>[1]</sup>。妥善处置这类废弃物已成为当前亟待解决的问题之一。作为我国最重要的棉花产区, 新疆棉花产量占全国总产量的 90% 以上。棉秆(CS)是棉花种植的主要副产物, 年产量超过 1 000 万吨, 是一种具有重要开发潜力的农业可再生资源。因此, 高效利用棉秆对推动农业绿色低碳循环发展具有重要意义。尽管新疆农作物秸秆综合利用效率已超过 90%, 但棉秆目前仍以直接粉碎还田为主要处理方式<sup>[2]</sup>。在此背景下, 有必要进一步拓展棉秆资源化利用途径, 推动其由传统废弃物向高附加值资源转化。马嘉宁等<sup>[3]</sup>研究表明, 采用纤维素降解菌处理秸秆可加速其分解并提高还田效率。此外, 新疆作为我国主要的覆膜农业区, 农用地

膜覆盖面积已超过总耕地面积的 50%<sup>[4]</sup>。目前新疆地区广泛使用的聚乙烯(PE)地膜虽然具有成本低、耐老化等优点<sup>[5]</sup>, 但由于难以自然降解、再加工产业链效益不高、回收经济性差等原因, 残膜回收仍面临严峻挑战。值得注意的是, 约 60% 的回收残膜中混杂有棉秆残茬、棉纤维等田间杂物<sup>[6]</sup>, 分离困难, 严重制约残膜的二次资源化利用。因此, 开发残膜与杂质的高效共处理技术对实现新疆农业可持续发展具有重要意义。

化学链共气化(CLCG)技术是在化学链燃烧(CLC)基础上发展起来的一种低能耗、低成本气化方法, 可将生物质和固体废弃物高效转化为合成气(图 1)。该技术的核心是借助载氧体(OC)中的晶格氧参与气化反应。具体过程为: 燃料首先发生热解, 生成挥发分和焦炭; 随后在气化反应器中, OC 的

收稿日期: 2025-12-25; 修回日期: 2026-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(21766037); 新疆大学大学生创新创业训练计划项目(S202410755069)。

作者简介: 孙思盈(2005-), 女, 本科生, 研究方向为生物质化学链气化, 13755710221@163.com; 亚力昆江·吐尔逊(1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向为生物质和煤热化学转化, 通讯联系人, yalkunjan54@aliyun.com。

晶格氧替代分子氧与燃料反应生成合成气,同时 OC 被还原;还原态 OC 在空气反应器中重新氧化恢复晶格氧,实现化学链的过程。CLCG 过程中,气体产物主要来自热解挥发分,生物质热解挥发分产率可达 80%<sup>[7]</sup>,PE 则高达 99%<sup>[8]</sup>,因此挥发分与 OC 的反应是 CLCG 的关键步骤之一<sup>[9]</sup>。此外,金属载体对热解过程中产生的焦油具有催化重整作用,可通过提供活性位点促进大分子焦油裂解为小分子气体,从而显著降低焦油含量<sup>[10]</sup>。

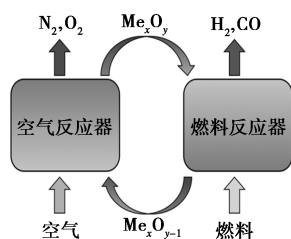


图 1 化学链气化技术原理图

研究表明,生物质与塑料共气化存在显著的协同效应。Burra 等<sup>[11]</sup>发现,废木屑与 PE 共气化时,其合成气产量高于两者单独气化产量之和。Kaydough 等<sup>[12]</sup>在对稻壳-PE、锯末-高密度聚乙烯(HDPE)等体系的研究中指出,共气化不仅能够提高气体产率,还可有效抑制焦油的生成。进一步地,Zhang 等<sup>[13]</sup>的研究发现,当 PE 含量为 25%时,总气体收率达到 1.41 Nm<sup>3</sup>/kg,其中氢气体积分数达 45.0%。

郭万军等<sup>[14]</sup>研究发现铁矿石作为载体具有较好的反应活性,能有效地促进化学链气化反应的进行。在 CLCG 中,常用的载体包括 Cu、Ni、Co、Fe、Mn 等过渡金属氧化物<sup>[15]</sup>。Wang 等<sup>[16]</sup>采用 Fe 基载体对松木锯末进行气化,发现当 NiO 负载量为 1%~7%时效果最佳,合成气中 H<sub>2</sub> 浓度为 43.06%,碳转化率达 78.22%,气体热值为 9.36 MJ/kg。目前关于多组分复合载氧体的研究主要集中在 Fe 基与其他过渡金属氧化物的复合体系。Son 等<sup>[17]</sup>比较了 NiO 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的反应性能,结果显示 NiO 活性更优,且当 NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比例为 3 时复合载氧体的燃烧效率最高。

基于以上研究背景,本文采用浸渍法制备了载镍铁矿石作为载体,结合了良好的结构稳定性、抗积炭性能与高反应活性。在两段式固定床反应器中,在 CS 与 PE 质量比 3:1 的条件下系统研究了 CS 与 PE 的化学链共气化过程,重点考察了 NiO 负载量、气化温度、载体与燃料质量比及水蒸气添加量对气体产率、焦油产量的影响,并通过多种表征手段分析了 OC 在反应过程中的物理化学演变机制。

## 1 实验部分

### 1.1 原料和载氧体制备

本研究所用棉秆来自中国新疆库车,CS 的工业分析与元素分析如表 1 所示。聚乙烯由中石化茂名分公司提供。CS 和 PE 经过研磨、筛分,将粒径控制在 250~425 μm。其中,CS 在 105℃烘箱中干燥 12 h 备用。实验所用铁矿石先粉碎,收集 250~425 μm 的颗粒并洗涤去除粉尘。再通过浸渍法将这些颗粒浸泡于饱和硝酸镍溶液中 24 h,浸渍后的颗粒利用旋转蒸发仪浓缩至粘稠状,继而在 105℃烘箱中干燥 24 h。随后,将干燥产物置于马弗炉中,以 10℃/min 的速率升温至 950℃并保持 3 h,以增强其机械强度。

表 1 棉秆的工业分析与元素分析

工业分析/(%, ad)				元素分析/(%, daf)				
M <sub>ad</sub>	A	V	FC	C	H	N	S	O <sup>①</sup>
4.25	5.68	70.33	19.74	44.21	5.74	0.86	0.13	49.06

注:①差减法计算获得。

### 1.2 实验设置

实验采用如图 2 所示的两段式固定床反应器,其主要部件包括气体供应单元、长 1 060 mm、内径 28 mm 的石英管反应器(由 350 mm 热解区和 250 mm 气化区共同构成)、温度控制组件、焦油冷凝段及气体采样系统。热解区温度固定在 650℃,气化区温度则在 700℃至 900℃之间调节。所有温度区域均从环境温度开始加热,并由控制系统确保达到设定值。蒸汽通过水泵和预热系统引入。实验前,3 g CS 与 1 g PE 的混合物装入石英篮(长 120 mm,内径 20 mm),并将其置于固定床反应器上段顶部;同时,预定量的 OC 放置在反应器下部区域。高纯度氮气(N<sub>2</sub>)作为载气,以 300 mL/min 的恒定流速通过干式流量计(日本 SINAGAWA 公司 DC-2C)。到达设定温度后,石英篮通过推拉杆迅速推入 650℃的热解区,燃料混合物在此快速热解 30 min,生成的热解挥发物在载气作用下通过气化区,并与 OC 反应。随后,产物被导入冷却段,利用-20℃的冷阱收集可冷凝组分。不可凝气体则由干式流量计测量后收集于气袋,用于后续气相色谱分析。气体成分采用配备热导检测器的 INFICON Micro GC Fusion 气相色谱仪进行定量分析。液体产物收集后,遵循 ASTM D95—05e1(2005)标准对焦油和水进行分离。

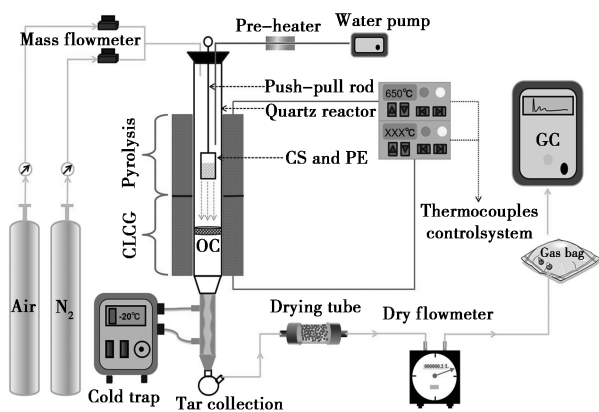


图 2 两段式固定床反应器示意图

每种气体的体积 ( $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_3H_6$  及  $C_3H_8$ 、 $C_4H_{10}$ ) 可依据气体的总体积, 通过公式(1)和公式(2)计算得出:

$$V_{out} = (F_{N_2} \times t) / (1 - \sum X_i) \quad (1)$$

$$V_i = V_{out} \times X_i \quad (2)$$

其中,  $V_{out}$  为气袋的总体积, L;  $F_{N_2}$  为  $N_2$  流量, mL/min;  $t$  为每袋气体收集所用时间, min;  $X_i$  为气体产物中  $i$  组分的体积分数;  $V_i$  为气体组分  $i$  的体积分数。

气体产物的产率通过公式(3)与公式(4)计算得出:

$$Y_i = [(M_i V_i / 1000 V_m) / M_{Fuel}] \times 100\% \quad (3)$$

$$Y_{总计} = \sum Y_i \quad (4)$$

其中,  $Y_i$  为气体产物的产率,  $Nm^3/kg$ ;  $M_{Fuel}$  为 CS 和 PE 样品的总重量, g;  $V_m$  为 298 K 时的气体摩尔体积 ( $24.5 L/mol$ );  $Y_{总计}$  为总气体产量,  $Nm^3/kg$ 。

焦油含量,  $g/Nm^3$ , 是根据焦油质量与燃料质量的比值估算得出, 并由公式(5)推导出来:

$$\text{焦油含量} = (M_{tar} / V_T) \times 100\% \quad (5)$$

其中,  $M_{tar}$  为测试中收集的焦油质量, g;  $V_T$  为干燥气体的体积,  $Nm^3$ 。

### 1.3 载氧体的表征

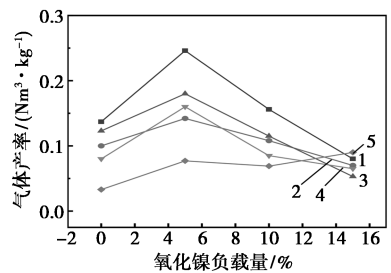
采用 X 射线粉末衍射分析 (D8 Advance, Bruker) 确定实验制备 OC 的晶相组成变化 (扫描速度为  $2^\circ/min$ , 扫描范围为  $5^\circ$  至  $80^\circ$ )。通过电子扫描显微镜 (Phenom proX, PHENOM Pure), 分析 OC 表面形貌的变化。利用氢气程序升温还原 (ChemBET TPR/TPD, Anton Paar) 对 OC 还原性能进行评估分析。

## 2 结果与讨论

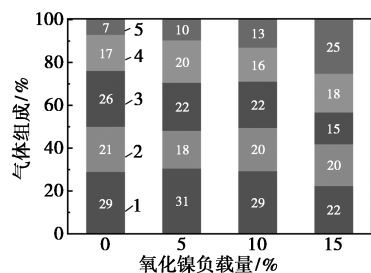
### 2.1 NiO 负载量对反应性能的影响

铁矿石上 NiO 的负载量对反应过程中的气体

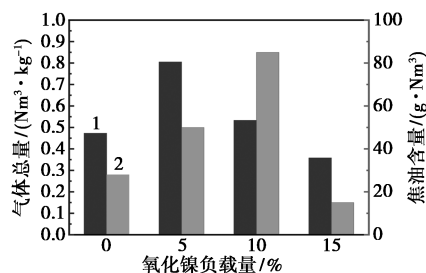
产率、气体组成及焦油产量有显著影响。本研究系统考察了 NiO 负载质量分数 (0% 到 15%) 对反应性能的影响, 结果如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 随着 NiO 负载量的增加,  $H_2$  与  $CO$  的产率均呈现先升高后降低的趋势。当负载量由 0% 提高至 5% 时,  $H_2$  产率从  $0.14 Nm^3/kg$  增至  $0.25 Nm^3/kg$ ,  $CO$  产率也从  $0.12 Nm^3/kg$  同步上升至  $0.18 Nm^3/kg$ 。然而, 继续增加负载量至 15% 时, 两者产率分别下降至  $0.08 Nm^3/kg$  与  $0.05 Nm^3/kg$ 。与此同时,  $CH_4$  及  $CO_2$  的产率在相同负载范围也表现出先小幅上升后降低的趋势, 而  $C_2 \sim C_4$  表现为小幅度上升趋势。图 3(b) 显示,  $H_2$  在总气体组成中随 NiO 负载量增加同样呈现先增后减的趋势,  $CO$  在总气体组成中在 NiO 负载量在 0 到 10% 范围内小幅度下降, 并在负载量为 15% 时降低至 15%。5% NiO 负载量下两气体产率分别达到 31% 与 22%。这一变化与产率趋势基本一致。图 3(c) 可观察到, 总气体产率随 NiO 负载量



1- $H_2$ ; 2- $CH_4$ ; 3- $CO$ ; 4- $CO_2$ ; 5- $C_2 \sim C_4$   
(a) 各气体产率



1- $H_2$ ; 2- $CH_4$ ; 3- $CO$ ; 4- $CO_2$ ; 5- $C_2 \sim C_4$   
(b) 各气体组成



1-总气体产率; 2-焦油含量  
(c) 总气体产率与焦油含量

图 3 NiO 负载量对气化性能的影响

增加先上升后下降,并在 NiO 负载量为 5% 时达  $0.75 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 。焦油含量也表现出相似的先升后降变化趋势。

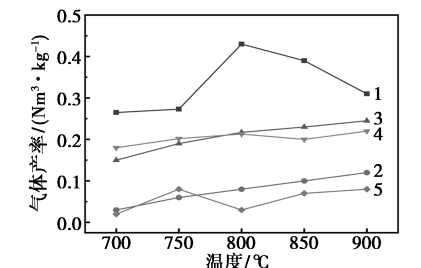
## 2.2 气化温度对反应性能的影响

气化温度对合成气质量提升有决定性影响<sup>[18]</sup>,适当提高气化温度有助于提升合成气产率并抑制焦油生成。为探究气化温度对合成气产率及组成的影响,在  $700^\circ\text{C}$  至  $900^\circ\text{C}$  范围内考察了气化温度对气体产率、气体组成及焦油产量的影响。如图 4(a) 所示,随着气化温度升高,CO 与  $\text{H}_2$  的产率均呈现先上升后下降的趋势。CO 产率在  $800^\circ\text{C}$  达峰值  $0.22 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ,较  $700^\circ\text{C}$  的  $0.15 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  提升 32%,随后在  $900^\circ\text{C}$  时略微升至  $0.25 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 。 $\text{H}_2$  产率同样于  $800^\circ\text{C}$  出现峰值  $0.43 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ,随后在  $900^\circ\text{C}$  下降至  $0.31 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 。 $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$  气体在  $700 \sim 900^\circ\text{C}$  范围内,产率在  $0.02 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  至  $0.08 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  区间波动。而  $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  的产率在整个温度区间内变化较缓,仅

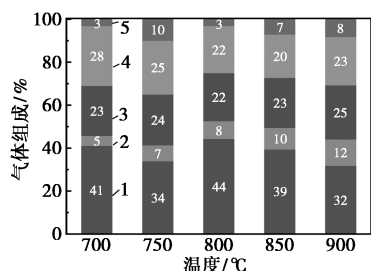
呈现小幅上升。图 4(b) 显示, $\text{H}_2$  在总气体中的占比于  $800^\circ\text{C}$  达到 44%,随后  $900^\circ\text{C}$  时降至 32%;CO 的占比同样在  $800^\circ\text{C}$  占总气体的 22%。整个温度区间内, $\text{CO}_2$  在总气体中占比 20% 到 28%, $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$  组分的占比则在 3% 到 10% 之间,并在  $800^\circ\text{C}$  出现最小值。焦油产量随温度的变化如图 4(c) 所示。在  $700^\circ\text{C}$  到  $850^\circ\text{C}$  范围内,焦油产量从  $125 \text{ g}/\text{Nm}^3$  持续下降,经  $750^\circ\text{C}$  的  $60 \text{ g}/\text{Nm}^3$ 、 $800^\circ\text{C}$  的  $40 \text{ g}/\text{Nm}^3$ ,至  $850^\circ\text{C}$  达到最低值  $30 \text{ g}/\text{Nm}^3$ ;而当温度进一步升至  $900^\circ\text{C}$  时,焦油产量至  $107 \text{ g}/\text{Nm}^3$ 。

## 2.3 载氧体与燃料质量比对反应性能的影响

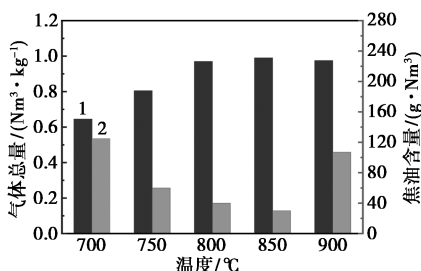
还原态载氧体能有效催化气化重整,提高合成气含量<sup>[19]</sup>,较高的载氧体含量有助于降低焦油含量,但过高的载氧体含量可能导致  $\text{CO}_2$  产率上升,不利于合成气生成,增加反应器的成本和运行需求,因此精确控制载氧体与燃料质量比对合成气生产至关重要。如图 5(a) 所示,随载氧体与燃料质量比增加, $\text{H}_2$  和 CO 的产率均呈现先升高后降低的趋势。在载氧体与燃料质量比从 0 提高至 30 的过程中, $\text{H}_2$  产率由  $0.10 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  上升至  $0.43 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ,CO 产率由  $0.10 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  同步增长至  $0.41 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ;然而当比例进一步升至 35 时,两者产率分别回落至  $0.32 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  和  $0.30 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 。同时,在此质量比范围内,可观察到  $\text{CO}_2$  产率从  $0.10 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  增加至  $0.28 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ,随后维持在  $0.27 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  附近小幅波动。与此相反, $\text{CH}_4$  及  $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$  烃类的产率则持续下降,最终接近零。如图 5(b) 所示,随着载氧体与燃料质量比从 0 增至 35, $\text{H}_2$ 、CO 和  $\text{CO}_2$  在总气体中的占比均呈先升后降趋势;而  $\text{CH}_4$  与  $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$  的占比则不断降低。在比例为 30 时,如图 5(c) 显示,总气体产率达到最高;而当比例继续增加至 35 时,总气体产率下降至  $0.94 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 。与此同时,焦油含量在载氧体与燃料质量比为 0 到 15 时持续降低,在 15 到 30 区间内小幅波动,而在比例达到 35 时出现回升。



1— $\text{H}_2$ ; 2— $\text{CH}_4$ ; 3—CO; 4— $\text{CO}_2$ ; 5— $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$   
(a) 各气体产率

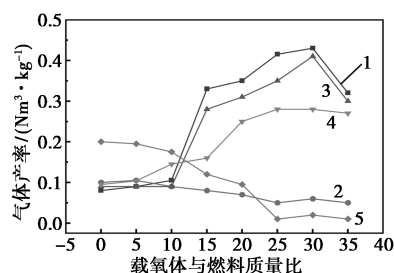


1— $\text{H}_2$ ; 2— $\text{CH}_4$ ; 3—CO; 4— $\text{CO}_2$ ; 5— $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$   
(b) 各气体组分

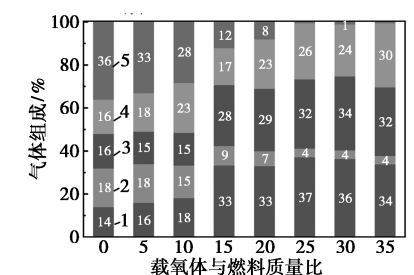


1—总气体产率; 2—焦油含量  
(c) 各气体产率与焦油含量

图 4 气化温度对气化性能的影响

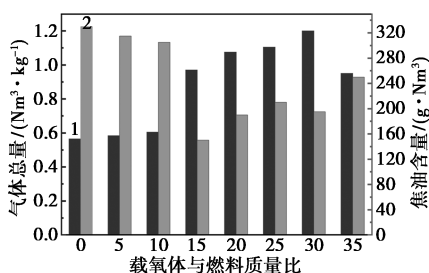


1— $\text{H}_2$ ; 2— $\text{CH}_4$ ; 3—CO; 4— $\text{CO}_2$ ; 5— $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$   
(a) 各气体产率



1—H<sub>2</sub>; 2—CH<sub>4</sub>; 3—CO; 4—CO<sub>2</sub>; 5—C<sub>2</sub>~C<sub>4</sub>

(b) 各气体组成



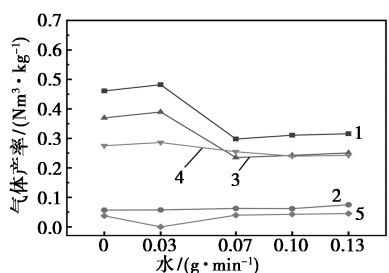
1—总气体产率; 2—焦油含量

(c) 总气体产率与焦油含量

图 5 载氧体与燃料质量比对气化性能的影响

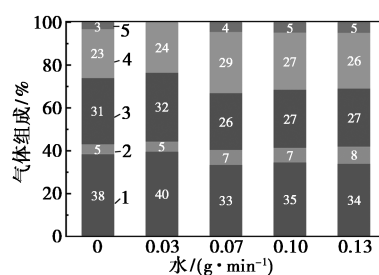
### 2.4 水蒸气添加量对反应性能的影响

在化学链共气化过程中,水蒸气作为关键反应介质,对反应性能具有多重影响<sup>[20]</sup>。因此,实验研究并考察了水蒸气添加量对气体产率、气体组成及焦油产量的影响。据图 6(a)所示,随着水蒸气添加量的增加,CO 和 H<sub>2</sub> 的产率均呈现先升后降并逐渐平缓的趋势。CO 产率从无水蒸气氛围时的 0.37 Nm<sup>3</sup>/kg 增至峰值 0.39 Nm<sup>3</sup>/kg, H<sub>2</sub> 产率则从 0.46 Nm<sup>3</sup>/kg 上升至最高值 0.48 Nm<sup>3</sup>/kg; 当添加量达到 0.07 g/min 后,两者分别下降至 0.25 Nm<sup>3</sup>/kg 和 0.30 Nm<sup>3</sup>/kg。与此同时,CO<sub>2</sub> 产率随着水蒸气添加量的增加而表现出持续缓慢下降趋势,由 0.29 Nm<sup>3</sup>/kg 逐步降至 0.24 Nm<sup>3</sup>/kg。相比之下,CH<sub>4</sub> 与 C<sub>2</sub>~C<sub>4</sub> 烃类的产率则呈现微弱上升趋势,分别从 0.06 Nm<sup>3</sup>/kg 和 0.04 Nm<sup>3</sup>/kg 增加至 0.07 Nm<sup>3</sup>/kg 和 0.05 Nm<sup>3</sup>/kg。如图 6(b)所示,当水蒸气添加量



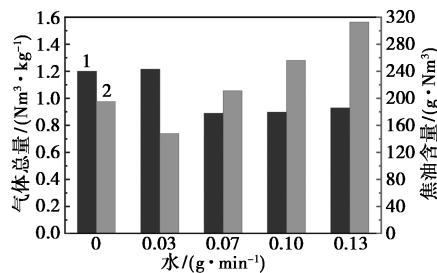
1—H<sub>2</sub>; 2—CH<sub>4</sub>; 3—CO; 4—CO<sub>2</sub>; 5—C<sub>2</sub>~C<sub>4</sub>

(a) 各气体产率



1—H<sub>2</sub>; 2—CH<sub>4</sub>; 3—CO; 4—CO<sub>2</sub>; 5—C<sub>2</sub>~C<sub>4</sub>

(b) 各气体组成



1—总气体产率; 2—焦油含量

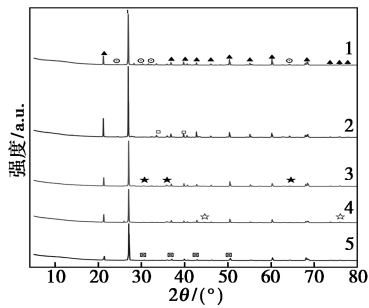
(c) 总气体产率与焦油含量

图 6 水蒸气添加量对气化性能的影响

为 0.03 g/min 时, H<sub>2</sub> 在总气体中的占比达到峰值 40%。CH<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>~C<sub>4</sub> 的相对含量同时随水蒸气添加量增加而小幅度波动; 而 CO<sub>2</sub> 的相对产率则呈现先降后升的趋势。图 6(c) 表明, 总气体产率表现为先升后降随后略微回升的趋势; 焦油含量则总体呈先下降后上升的趋势, 并在 0.03 g/min 时达到最低值。

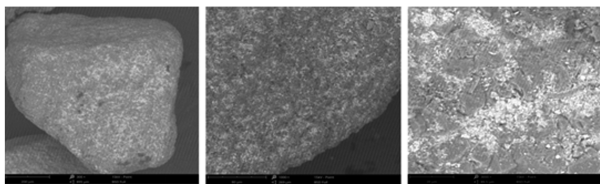
### 2.5 载氧体表征分析

新鲜及反应后 OC 的 X 射线衍射图谱如图 7 所示。新鲜铁矿石的主要成分为 SiO<sub>2</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 其中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衍射峰出现在 33.47、36.06、64.11° 处。随后负载 NiO 的 OC 样品上, NiO 衍射峰于 37.45° 和 43.54° 处出现, 这表明 NiO 成功负载于铁矿石上。气化反应后, 观察到 OC 样品中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的衍射峰消失, 并转化为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 衍射峰(位于 30.65、36.04、64.56° 处), 说明 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在反应过程中被还原为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 同时释放晶格氧参与气化反应, 该结果与李延兵等<sup>[21]</sup>的研究一致。随着载氧体与燃料质量比提高至 30, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的衍射峰转化为 Fe-Ni 合金衍射峰(出现在 44.48° 和 75.85° 处)。这表明 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 被进一步还原, 并与 Ni 形成合金相, 从而持续提供晶格氧。值得注意的是, 在引入水蒸气的反应氛围后, NiO 的衍射峰转变为 Ni-Se 合金衍射峰(位于 30.67、37.12、42.82、50.73°)。这说明水蒸气的引入导致了 NiO 被还原并转化为合金相存在。

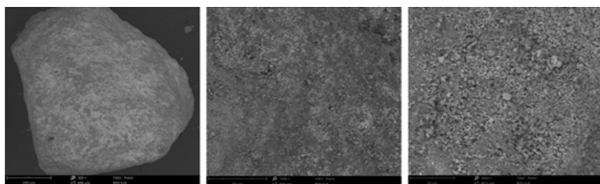


1—新鲜铁矿石;2—NiO 负载量 5% 的新鲜载氧体;  
3—NiO 负载量 5% 的反应后载氧体;4—OC/Fuel=30,  
NiO 负载量 5% 的反应后载氧体;5—OC/Fuel=30,  
NiO 负载量 5% 的反应后载氧体(水蒸气氛围)  
▲—SiO<sub>2</sub>;○—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;□—NiO;★—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>;☆—Fe-Ni<sub>3</sub>;◻—Ni-Se  
图 7 不同载氧体在反应前后的 X 射线衍射图谱

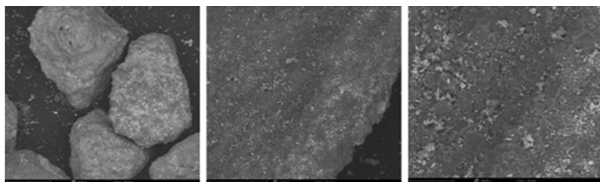
通过扫描电子显微镜对 OC 反应前后的表面形貌进行观察,结果如图 8 所示。新鲜铁矿石表面相对平滑,孔隙结构较少且分布稀疏。经 5% NiO 负载后,样品表面呈现明显凹凸不平的形貌,并附着细小颗粒,这表明 NiO 成功负载于铁矿石表面。反应后的 OC 表面出现不规则片状堆积结构,该现象可



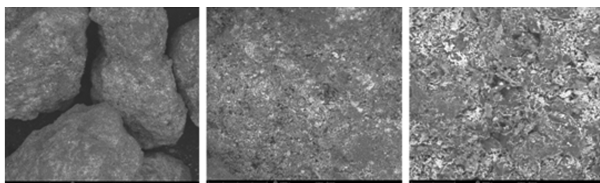
(a) 新鲜铁矿石



(b) 新鲜载氧体



(c) 反应后载氧体(无水蒸气氛围)

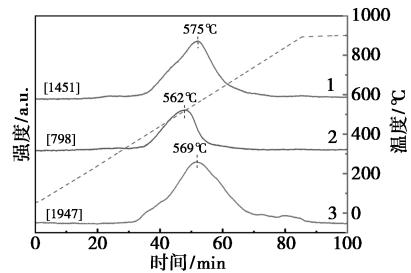


(d) 反应后载氧体(水蒸气氛围)

图 8 不同载氧体在反应前后的扫描电子显微镜图像

归因于反应过程中 OC 发生的团聚与烧结。而进一步在反应体系中引入水蒸气氛围后,OC 表面出现局部微裂纹,但整体形貌相比于无水蒸气条件下反应的样品较为平整,表面突起减少。

如图 9 所示,通过氢气程序升温还原分析载氧体的还原能力。新鲜 OC 在 569℃ 出现 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的还原峰,其 H<sub>2</sub> 消耗量达 1 947 μmol/g。反应后 OC 的还原峰移动至 562℃,H<sub>2</sub> 消耗量降至 798 μmol/g,仅占新鲜铁矿石的 40.98%,这表明 CLCG 反应中有 59.02% 的晶格氧被反应消耗。引入水蒸气后,OC 还原峰温度略微上升至 575℃,H<sub>2</sub> 消耗量增至 1 451 μmol/g,相当于新鲜铁矿石总消耗量的 74.52%。结果表明,在水蒸气氛围下,仅 25.48% 的晶格氧参与了 CLCG 反应,其利用率较无水蒸气条件显著降低,这一趋势与刘思琦等<sup>[22]</sup>的研究一致。



1—反应后载氧体(有水蒸气氛围);2—反应后载氧体  
(无水蒸气氛围);3—新鲜铁矿石

图 9 不同载氧体在反应前后的氢气程序升温还原图像

### 3 结论

在 NiO 负载量为 5%、温度为 800℃ 的条件下,总气体产率呈现先上升后下降的趋势,其峰值达到 0.97 Nm<sup>3</sup>/kg,此时 H<sub>2</sub> 与 CO 在总气体中的占比分别为 39.23% 和 30.04%。实验进一步表明,当载氧体与燃料质量比为 30 并在水蒸气氛围下,总气体产率表现出先升后降、随后小幅回升的趋势;并在水蒸气添加量为 0.03 g/min 时,出现气体产率峰值 1.22 Nm<sup>3</sup>/kg。且实验发现继续提高水蒸气添加量,会导致合成气产率下降,焦油产量上升。载氧体在化学链共气化反应中,其晶相与表面形貌发生显著演变:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 首先被还原为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,随后在载氧体/燃料质量比升至 30 时进一步转化为 Fe-Ni 合金;引入水蒸气氛围后,NiO 转变为 Ni 合金。反应后的载氧体颗粒出现团聚并产生微裂纹。水蒸气的引入导致晶格氧利用率由 59.02% 大幅下降至 25.48%,大幅度削弱了载氧体的持续供氧能力。

## 参考文献

- [1] 王雨轩, 国芬芬, 江志成, 等. 生物质废弃物催化制备果糖和乳酸研究进展[J]. 能源环境保护, 2024, 38(5): 115-126.
- [2] 郭慧静, 沈从举, 代亚猛, 等. 新疆棉花秸秆利用现状及发展对策[J]. 农业工程, 2023, 13(4): 48-53.
- [3] 马嘉宁, 韩传洋, 赵小庆, 等. 利用纤维素降解菌提高秸秆还田效率的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(6): 1033-1045.
- [4] 王海基, 王敏, 王吉亮, 等. 新疆农田残膜污染治理技术与防控策略[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 166-174.
- [5] 李慧军, 刘勤, 周明冬, 等. 新疆地区农田地膜残留影响因素及污染强度评价[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 656-665.
- [6] 蒋德莉, 陈学庚, 颜利民, 等. 农田残膜资源化利用技术与装备研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 179-190.
- [7] Wang Y, Li B, Gao A, *et al.* Volatile-char interactions during biomass pyrolysis; Effect of biomass acid-washing pretreatment[J]. Fuel, 2023, 340: 127496.
- [8] Ballice L, Yüksel M, Sağlam M, *et al.* Classification of volatile products from the temperature-programmed pyrolysis of low-and high-density polyethylene[J]. Energy & Fuels, 1998, 12(5): 925-928.
- [9] Abduhani H, Tursun Y, Dai Z, *et al.* Chemical looping gasification characteristics of biomass pyrolysis volatiles with Cu/Ni/olivine oxygen carrier for hydrogen-rich gas[J]. Energy, 2025, 314: 134209.
- [10] Nguyen N M, Alobaid F, Dieringer P, *et al.* Biomass-based chemical looping gasification: Overview and recent developments[J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 7069.
- [11] Burra K G, Gupta A K. Synergistic effects in steam gasification of combined biomass and plastic waste mixtures[J]. Applied Energy, 2018, 211: 230-236.
- [12] Kaydouh M N, El Hassan N. Thermodynamic simulation of the co-gasification of biomass and plastic waste for hydrogen-rich syngas production[J]. Results in Engineering, 2022, 16: 100771.
- [13] Zhang W, Tursun Y, Abduhani H, *et al.* Chemical looping co-gasification of cotton stalk and polyethylene over CuO/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> oxygen carrier[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 525: 170378.
- [14] 郭万军, 张海峰, 葛晖骏, 等. 基于铁矿石载氧体的生物质化学链气化机理研究[J]. 热科学与技术, 2016, 15(3): 249-258.
- [15] 司马皓, 王雪峰, 邓存宝. 铜基载氧体催化电厂烟气脱氧研究[J]. 燃料化学学报(中英文), 2024, 52(6): 839-849.
- [16] Wang P, Pu G, Liu Q, *et al.* Alkali metal modified iron-nickel oxygen carrier to produce hydrogen-rich synthesis gas by chemical looping gasification with pine sawdust[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(4): 5165-5176.
- [17] Son S R, Kim S D. Chemical-looping combustion with NiO and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a thermobalance and circulating fluidized bed reactor with double loops[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(8): 2689-2696.
- [18] 吴家桦, 沈来宏, 肖军, 等. 串行流化床生物质气化制取合成气试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(11): 111-118.
- [19] 方小杰, 赵坤, 赵增立, 等. CeO<sub>2</sub>/LaFeO<sub>3</sub> 用于甲烷化学链重整制取合成气反应性能研究[J]. 燃料化学学报, 2021, 49(9): 1250-1260.
- [20] 林德顺, 丁宁, 李炜光, 等. CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 氧载体与小麦秆-煤化学链共气化研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(2): 188-195.
- [21] 李延兵, 张帅, 刘秋生, 等. 赤铁矿和钛铁矿载氧体化学链煤燃烧特性[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(6): 70-75.
- [22] 刘思琦, 何方, 赵坤, 等. 赤泥-铜矿石复合载氧体用于煤化学链气化性能研究[J]. 新能源进展, 2021, 9(5): 394-401. ■
- [15] Li Y, Tian B, Xiao R, *et al.* Paenibacillus mucilaginosus LT1906 exopolysaccharide-based composite aerogel for flexible strain sensor[J]. Polymer, 2022, 263: 125517.
- [16] Kidron G J, Lichner L, Fischer T, *et al.* Mechanisms for biocrust-modulated runoff generation: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 231: 104100.
- [17] Canton Y, Chamizo S, Rodriguez E, *et al.* Water regulation in cyanobacterial biocrusts from drylands: Negative impacts of anthropogenic disturbance[J]. Water, 2020, 12: 720.
- [18] Qiu L, Wu J, Du W, *et al.* Response of soil bacterial communities to sulfadiazine present in manure: Protection and adaptation mechanisms of extracellular polymeric substances[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 408: 124887.
- [19] Wang N Q, Wang T Q, Chen Y, *et al.* Microbiome convergence enables siderophore-secreting-rhizobacteria to improve iron nutrition and yield of peanut intercropped with maize.[J]. Nature Communications, 2024, 15: 839.
- [20] Feng Q, Luo Y, Liang M, *et al.* Rhizobacteria protective hydrogel to promote plant growth and adaption to acidic soil[J]. Nature Communications, 2025, 16: 56988. ■

(上接第 161 页)

- [10] Pour M M, HassaniSaadi M, Kennedy J F, *et al.* A novel biopolymer technique for encapsulation of Bacillus velezensis BV9 into double coating biopolymer made by in alginate and natural gums to biocontrol of wheat take-all disease[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128526.
- [11] Lim G P, Ahmad M S. Development of Ca-alginate-chitosan microcapsules for encapsulation and controlled release of imidacloprid to control dengue outbreaks[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2017, 52: 297-307.
- [12] Vu T H N, Quach N T, Nguyen N A, *et al.* Genome mining associated with analysis of structure, antioxidant activity reveals the potential production of levan-rich exopolysaccharides by food-derived bacillus velezensis VTX20[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 7055.
- [13] Boumaza K, Marir R. Astonishing emulsifying properties of a novel exopolysaccharide produced from Bacillus velezensis BABA50[J]. Natural Product Research, 2024, 39(9): 2508-2514.
- [14] 贺湘睿, 裴向军, 李强, 等. 高产 EPS 菌株的筛选鉴定及其在渣土改良中的应用研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(6): 677-688.