

小麦秸秆真空氧载体气化特性实验研究

李 冲^{1,2}, 胡建军^{1,2}, 张 寰^{1,2}, 李 盾^{1,2}, 郭前辉^{1,2}, 刘新萍¹

(1. 河南农业大学生物质能源河南省协同创新中心, 郑州 450002; 2. 农业部农村可再生能源新材料与装备重点实验室, 郑州 450002)

摘 要: 在自制的生物质真空氧载体气化反应装置上,考察无氧载体时反应温度对气体产物分布及合成气中 H_2 和CO总含量的影响情况,研究氧载体对小麦秸秆真空气化过程的影响规律,并借助扫描电镜(SEM)对反应前后的氧载体进行表征。实验结果表明:无氧载体时,随着反应温度的升高,合成气中 H_2 和CO含量均逐渐增大,750℃时 H_2 含量达到10.13%;当反应温度从550℃升高到800℃时,反应温度对 CO_2 含量影响最为显著, CO_2 含量从27.31%减小到14.43%。有氧载体时,在上述反应温度范围内, H_2 含量从6.43%升至13.62%,合成气中 H_2/CO 值、 H_2 和CO总含量均随反应温度的升高而增大;氧载体可增大气体产物中 H_2 与CO产量,同时 H_2/CO 值也明显增大,说明氧载体可促进生物质气化反应;在真空条件下,氧载体并未发生明显烧结,且反应后的氧载体结构更有利于生物质气化,但其机械强度有所降低。

关键词: 秸秆; 真空; 氧载体; 气化; 温度

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引 言

生物质能以其储量丰富、可再生的特点,逐渐受到世界关注,其高效转化与利用技术是当今可再生能源开发领域的焦点。利用秸秆类生物质气化制取生物质合成气不仅能缓解资源危机、减轻环境污染问题,还能提供清洁的高品位能源^[1,2]。目前应用较为成熟的生物质空气气化、 O_2 或富氧气化等方法均属于自热式气化工艺。其中空气气化由于空气中大量 N_2 的存在,合成气被稀释,导致品质降低; O_2 或富氧气化虽能有效改善燃气质量,但由于需纯氧或富氧,造成合成气成本增加,制约其工业化应用;氧载体气化利用氧载体中的晶格氧代替常规气化反应的气化介质,向生物质原料提供气化反应所需的O元素,从而避免 N_2 的稀释作用,提高合成气品质。

目前国内外学者对生物质气化技术进行了大量研究。这些研究主要利用玉米秸秆、水稻秸秆、

木屑和板栗壳等生物质原料^[3-5],且大多集中在生物质与煤共混、催化剂性能等方面^[6-8]。生物质氧载体燃烧方面的研究始于德国科学家 Diego 等^[9],此后国内外学者先后开展了许多关于生物质氧载体燃烧特性、氧载体制备等方面的研究工作^[10-12],为氧载体在生物质热化学转化中的应用做出了重要贡献。

近年来,有学者研究以天然铁矿石为氧载体的生物质气化特性,研究结果表明生物质氧载体气化具有良好的应用前景^[13,14]。因此,充分利用资源丰富的小麦秸秆,开展其氧载体气化制备醇醚燃料的合成气,对生物质能的清洁化、高值化、规模化利用具有重要的现实意义。本文以小麦秸秆粉为原料,在自制的生物质氧载体气化反应装置上,在真空条件下对生物质氧载体气化工艺参数进行实验研究。考察反应温度对小麦秸秆真空气化特性的影响情况,研究氧载体的加入对气体产物分布及合成气组分的影响规律,并借助扫描电镜(SEM)对反应前后的氧载体结构进行表征。

收稿日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(51576060; U1304528); 河南省高校科技创新人才支持计划(16HASTIT026); 河南省科技创新人才计划(174100510020)

通信作者: 胡建军(1977—), 男, 博士、教授、硕士生导师, 主要从事可再生能源工程方面的研究。hu.jianjun@163.com

1 实 验

1.1 原 料

实验所用小麦秸秆取自河南农业大学科教园区农学实验田。实验原料在使用前经干燥、粉碎和筛分的预处理过程。首先将小麦秸秆在 50 ℃干燥

箱中干燥 24 h,然后用磨粉机对原料进行粉碎,用 100 目标标准分样筛进行筛分,选取粒径小于 100 目的粉体,最后用自封袋置于干燥器中密封保存。

小麦秸秆的工业分析采用江苏双城分析仪器有限公司生产的全自动工业分析仪(MAC-100),元素分析采用意大利 EuroVector(EA3000)元素分析仪,分析结果如表 1 所示。

表 1 小麦秸秆的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of wheat straw

样品	工业分析/%wt, ad				元素分析/%wt, ad					发热量
	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>V</i>	<i>FC</i>	[C]	[H]	[O]	[N]	[S]	$Q_{net}/J\cdot g^{-1}$
小麦秸秆	7.57	9.70	66.56	16.17	47.26	6.30	45.05	1.28	0.11	14323

1.2 氧载体制备

实验所用氧载体为铁基复合氧载体。复合氧载体的制备采用浸渍法,将 Fe_2O_3 负载在 Al_2O_3 上,质量分数为 60% Fe_2O_3 +40% Al_2O_3 ^[15-17]。制备过程中,首先按照预先设计的质量比配制饱和 $Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$ 溶液($Fe(NO_3)_3\cdot 9H_2O$ 为分析纯,国药化学试剂),加入 Al_2O_3 颗粒(Al_2O_3 为分析纯,天津致远化学试剂)颗粒浸渍 4 h,然后将溶液置于 80 ℃水浴锅中搅拌,直至溶液水分几乎蒸干,呈浆糊状,历时 10 h,将所得物分装在瓷舟中,置于 400 ℃马弗炉中预处理 4 h,得到鲜红色块状氧载体前驱体。为了提高氧载体的机械强度,将其在 1000 ℃的马弗炉内煅烧 4 h 后进行破碎和筛分。选取粒径在 40~60 目的氧载体作为实验原料。

1.3 实验装置

实验所用装置为自制的固定床生物质真空氧载体气化反应装置。该装置主要由 N_2 瓶、温度控制柜、气体流量计、电炉、石英管反应器、真空泵和气体分析设备等组成。实验结构示意图如图 1 所示,主要包括气化系统、冷凝净化系统、尾气收集分析系统。气化系统主要由加热电炉、石英管反应器、温度控制柜组成。加热电炉是中空的外加热固定床式电加热炉,为实验提供所需温度,最高加热温度为 1100 ℃,炉内配有热电偶。石英管反应器外径为 60 mm,内径 50 mm,长 1000 mm,置于加热电炉中部。气体冷凝净化系统由水浴冷却装置以及干燥净化装置组成。尾气收集分析系统由真空泵、气体收集装置以及气相色谱仪组成。

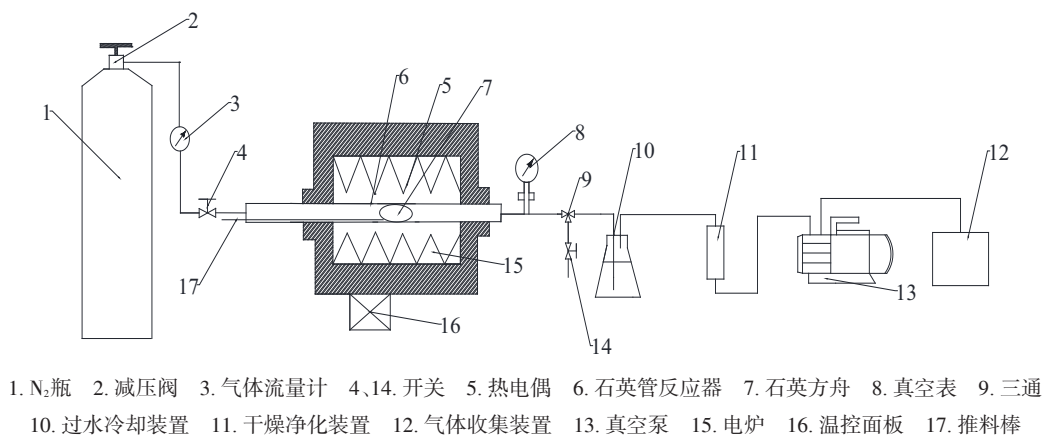


图 1 生物质真空氧载体气化装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of pyrolysis device

1.4 实验方法

实验条件:小麦秸秆粉末 5.0 g,升温速率设置为 20 °C/min。实验前将装有预先混合均匀的氧载体与生物质(质量比例为 1:2)的石英方舟置于石英管反应器的低温入口端,连接好实验装置并检查气密性。开启左侧 N₂瓶开关,打开图 1 所示的开关 4、14,以 500 mL/min 的流量持续通入 N₂约 10 min,以置换反应器中的空气,然后关闭开关 4、14。开启右侧真空泵开关,抽出反应器中的 N₂,当压力达到 5000 Pa 后,关闭真空泵。待温度控制柜显示器上的温度值稳定后,将方舟用推料棒 17 迅速推至石英管反应器中部,同时开始计时,反应时间设置为 10 min,产生的气体用真空泵抽出,并用针筒采样后通过气相色谱仪(GC)进行气体成分分析。气相色谱仪为 Agilent 6820(美国安捷伦科技公司)。气化反应结束后,开启开关 4、14,持续通入 N₂,使反应器温度快速降低至室温。

2 结果与分析

2.1 无氧载体时反应温度对合成气成分的影响

小麦秸秆在真空条件下高温热解,其气体产物主要成分(H₂、CO、CO₂、CH₄)随反应温度的变化情况如图 2 所示。当反应温度从 550 °C升高到 750 °C时,气体产物中 H₂含量随温度的升高逐渐增大,并且在 750 °C时达到最大值 10.13%。这表明在该温度范围内,反应温度的升高有利于 H₂的生成,温度越高越有利于焦油裂解,从而使 H₂含量增大。文献[18,19]认为,在生物质热解反应过程中,热量由颗粒表面传递到颗粒内部,由外至内进行裂解,产生一定量的挥发分与生物质炭。挥发分在多孔生物质内部进一步裂解,形成不可冷凝气体以及生物油,同时挥发分在多孔生物质的表面发生二次裂解反应。CO 含量随反应温度的升高,先增后减,在 750 °C达到最大值 27.21%。综上所述,750 °C有利于合成气中 H₂与 CO 含量的增大。郑冀鲁等^[20]研究的稻壳和锯屑快速裂解反应,其研究表明在热解气中 CO 与 CO₂的总含量超过 90%,且 CO₂含量高于 CO 含量。与此相比,本实验得到的气体产物中 CO 含量较高,这可能是由于真空缺氧环境对生物质内部结构的 C—C 键与 C—O 键在热解过程中的重新组合有很大影

响。CH₄含量随反应温度的升高先增大,后又有小幅减小,分析原因为温度的升高促进了 CH₄与氧载体的反应,生成水蒸气、CO₂和 FeO,这也与 CO₂含量在 800 °C有小幅升高相对应。

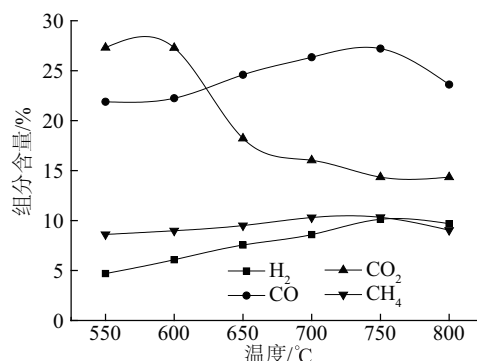


图2 反应温度对合成气成分的影响

Fig. 2 Effect of temperature on pyrolysis gas components

进一步分析图 2 可知,随着反应温度的升高,CH₄含量的增大速率明显低于 H₂,这表明反应温度在 550~750 °C时,热解过程主要以 H₂的生成反应为主,其中包括生物质热裂解反应、焦油的二次裂解反应等。值得注意的是:CO₂含量随反应温度的升高变化比较明显,从 27.31%减小到 14.43%,分析原因可能是 CO₂与生物质炭发生了还原反应,消耗了部分 CO₂,而且该反应为 Boudouard 反应的逆反应,Boudouard 反应为放热反应,温度升高有利于反应向逆反应方向进行。

2.2 有氧载体时反应温度对合成气成分的影响

小麦秸秆在真空条件下加入氧载体后,合成气中主要成分(H₂、CO、CO₂、CH₄)随反应温度的变化的趋势如图 3 所示。由图 3 可知,加入氧载体后气体产物中 CO 为主要成分。随着反应温度的升高,合成气中 CO 含量迅速增大,并在 700 °C后基本维持稳定,达到 28.36%。随着反应温度的升高,CO₂含量先增大后又逐渐减小,表明反应温度的升高,一方面促进了 CO₂的还原反应,另一方面对 Boudouard 反应有一定抑制作用,导致 CO₂含量不断减小,而 CO 含量逐渐增大。进一步分析图 3 可知,H₂与 CH₄的含量均呈逐渐增大的趋势。CH₄含量增大有如下可能原因:生物质气化产生的生物质炭和 H₂发生了甲烷化反应从而产生更多的 CH₄;生物质气化产生的焦油发生了热裂解反应,

由一级裂解反应转化为二级或多级裂解反应,产生了更多的 CH_4 和 H_2 。

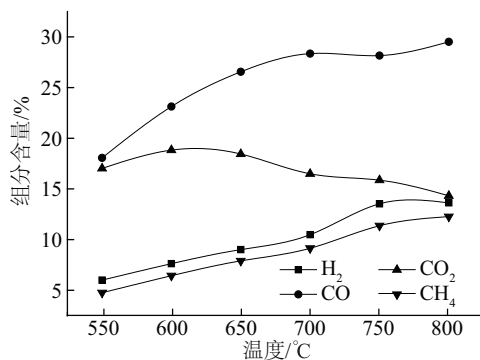


图3 有氧载体时反应温度对合成气成分的影响

Fig. 3 Effect of temperature on pyrolysis gas components with the presence of oxygen carriers

2.3 反应温度对合成气中 H_2 +CO 含量的影响

小麦秸秆在真空条件下,合成气中 H_2 +CO 含量随反应温度的变化趋势如图4所示。当反应温度从 550 °C 升高到 800 °C 时,加入氧载体前后 H_2 +CO 含量均有一定程度的增大。无氧载体时,随着反应温度的升高, H_2 +CO 含量从 26.58% 增大到 39.34%,在 800 °C 时有较为明显的降低。加入氧载体后, H_2 +CO 含量从 24.06% 增加到 41.69%。进一步分析图4可知,在相同反应温度条件下,加入氧载体的 H_2 +CO 含量明显增大,其原因可能是部分焦油与氧载体发生反应,焦油中 C—C 键、C—H 键发生断裂,生成了更多小分子气体;部分气体产物也在氧载体的作用下发生重整反应,例如 CO_2 和 CH_4 反应生成 CO 和 H_2 以及 CO 的歧化反应。因此加入氧载体后, H_2 和 CO 含量均有明显增加。

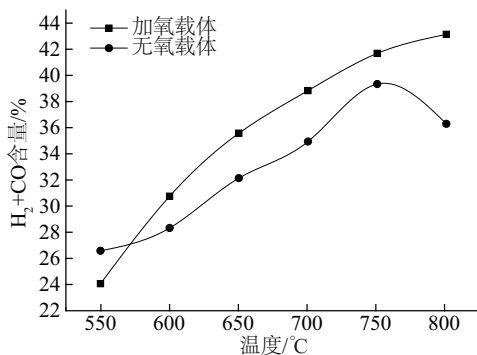


图4 反应温度对 H_2 +CO 含量的影响

Fig. 4 Effect of temperature on total gas production of H_2 and CO

2.4 反应温度对合成气中 H_2 /CO 值的影响

小麦秸秆在真空条件下的氧载体气化,合成气中 H_2 /CO 值随反应温度的变化趋势如图5所示。

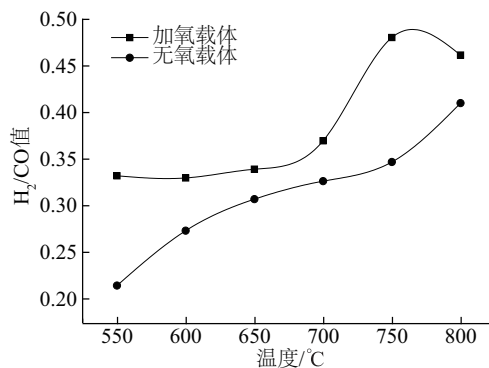


图5 反应温度对 H_2 /CO 值的影响

Fig. 5 Effect of temperature on H_2 /CO

由图5可知,当反应温度从 550 °C 升高到 800 °C 时, H_2 /CO 值呈增大趋势。分析原因可能是:随着温度的升高,二次裂解成为主导反应,气体产物中 CO 和 H_2 含量逐渐增大, H_2 的产生速率高于 CO。对比加入氧载体前后 H_2 /CO 值可知,加入氧载体有利于生物质焦油的进一步裂解。由于氧载体的存在,气固反应成为主导反应。反应后期 CO 与氧载体发生反应,氧载体提供部分晶格氧使 CO 转化为 CO_2 ,同时氧载体对焦油的裂解也起到促进作用,使 H_2 的产生速率大于 CO 的产生速率。

2.5 氧载体对生物质气化的影响

为了更直观地反映有无氧载体对生物质气化的影响情况。实验过程中设定氧载体与生物质质量比为 1:2,反应时间为 10 min。图6、图7为 650 °C 与 750 °C 时氧载体存在对合成气各组分浓度以及体积的影响。

分析图6、图7可知,氧载体的加入对合成气各组分含量以及各气体成分的体积有显著影响, H_2 、CO、 CO_2 含量及体积均有所增大, CH_4 含量的变化与反应温度有关。在生物质氧载体气化过程中,氧载体不仅为生物质气化提供晶格氧,促使气化中间产物的进一步氧化,还对焦油裂解具有一定的催化作用,加剧生物质气化反应,使 H_2 、CO、 CO_2 以及合成气总含量增大。这与文献[12,13]的

研究结果相符。对比分析图 6 与图 7 可知,在温度为 650 ℃时,合成气中有效组分的浓度以及体积已有明显增大,低于文献[12]的研究温度。分析其原因为:在真空状态下更有利于生物质的分解以及挥发分的析出。进一步分析图 6 可知,当氧载体存在时,CO 含量较高,CH₄ 含量较低,这是因为反应初期氧载体的晶格氧使部分生物质完全氧化为 CO₂ 和 H₂O,后期 CO₂ 又与 C 发生反应生成 CO,而 H₂O 与 CH₄ 发生反应进一步促进了 H₂ 与 CO 的生成。进一步分析可知图 7,加入氧载体后 H₂ 与 CO 的体积增大最为明显,说明氧载体的存在可明显改善合成气品质。

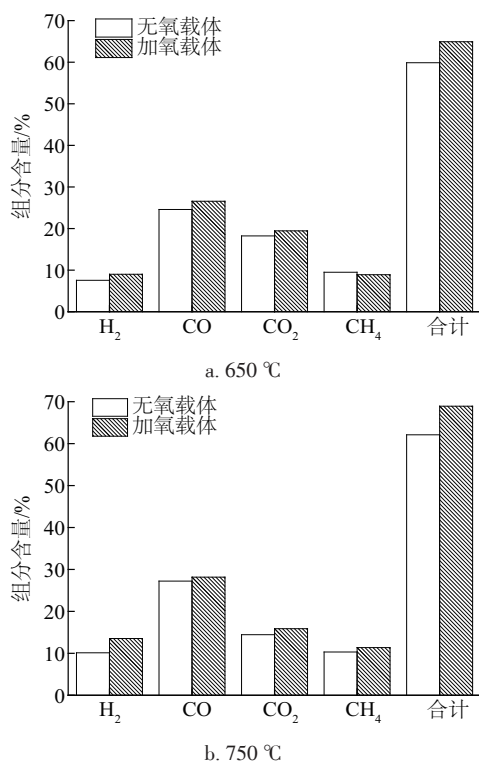


图6 氧载体存在对合成气各组分含量的影响
Fig. 6 Effect of the presence of oxygen carrier on gaseous concentrations

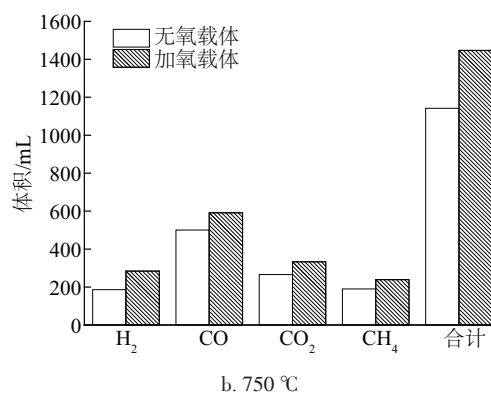
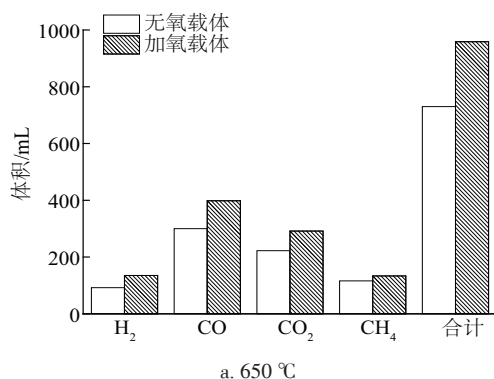
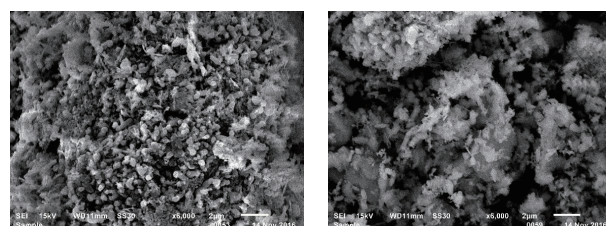


图7 氧载体存在对气体产物体积的影响

Fig. 7 Effect of the presence of oxygen carrier on gas yields

图 8 为氧载体在 650 ℃时循环使用 5 次前后的电镜扫描(SEM)图,图中放大倍数为 6000。由图 8 分析可知,反应前的氧载体表面充满了微小颗粒,循环使用 5 次后,由于反复的氧化还原反应,使氧载体表面变为尖刺状,表面上的孔隙变大。其原因可能是:在真空条件下,高温导致氧载体表面呈现出尖刺状,增大了氧载体与生物质的局部换热面积。这种结构有利于生物质的气化反应,但会减弱氧载体的机械强度,使氧载体的再生性变差。进一步分析图 8 可知,新鲜的氧载体循环使用 5 次后局部出现烧结。分析原因可能是:相对常压环境,真空条件下,由于反应温度较高,氧载体表面的辐射换热增加明显,容易导致局部热点,从而产生烧结现象。



a. 反应前
b. 循环使用5次后
图8 氧载体反应前后的SEM图

Fig. 8 SEM-EDS image of fresh and used oxygen carriers

3 结 论

本文利用自制的生物质真空氧载体气化实验装置,在氧载体与生物质的质量比为 1:2,压力为 5000 Pa,反应时间为 10 min,反应温度分别为 550、600、650、700、750、800 ℃条件下,进行小麦秸秆粉制备生物质合成气的实验研究。考察无氧载

体时反应温度对合成气成分的影响情况,并研究了加入氧载体对合成气成分的影响规律,得到以下主要结论:

1)当无氧载体时,反应温度的变化对 CO 、 CO_2 含量的影响显著,对 CH_4 含量的影响不明显。当反应温度为 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 时, H_2 和 CO 含量最大,分别为 10.13% 和 27.21% , CO_2 含量最小,为 14.43% ,表明该温度有利于合成气中有效组分含量的增加。

2)加入氧载体后,合成气中 H_2/CO 值、 H_2+CO 含量均随反应温度的升高而逐渐增大。与无氧载体比较,氧载体能显著增大 H_2 和 CO 含量, H_2/CO 值也得到明显提高。

3)加入氧载体后, H_2 、 CO 、 CO_2 含量及合成气总含量均有所上升,说明氧载体有利于生物质挥发分的进一步热裂解,促进了生物质气化反应。

4)在真空条件下,循环使用 5 次的氧载体并未发生明显烧结现象,且反应后的氧载体结构更有利于生物质气化反应,但其机械强度有所降低。

[参考文献]

- [1] 吴创之, 刘华财, 阴秀丽. 生物质气化技术发展分析[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(7): 798—804.
- [1] Wu Chuangzhi, Liu Huacai, Yin Xiuli. Status and prospects for biomass gasification[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(7): 798—804.
- [2] 闫金定. 我国生物质能源发展现状与战略思考[J]. 林产化学与工业, 2014, 34(4): 151—158.
- [2] Yan Jinding. Biomass to energy in China: Development status and strategic consideration[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2014, 34(4): 151—158.
- [3] 陈冠益, 高文学, 颜蓓蓓, 等. 生物质气化技术研究现状与发展[J]. 煤气与热力, 2006, 26(7): 20—26.
- [3] Chen Guanyi, Gao Wenxue, Yan Beibei, et al. Resent research status and development of biomass gasification technologies[J]. Gas & Heat, 2006, 26(7): 20—26.
- [4] Worasuwannarak N, Sonobe T, Tan-thapanichakoon W. Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corn cob by TG-MS technique[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007, 78(2): 265—271.
- [5] 王明峰. 板栗壳和锯末干馏热解特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
- [5] Wang Mingfeng. Reach on the carbonization pyrolysis characteristic of chestnut shell and sawdust[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007.
- [6] 邓 剑, 罗永浩, 张云亮, 等. 生物质半焦与煤混合气化协同作用的动力学研究[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(8): 943—951.
- [6] Deng Jian, Luo Yonghao, Zhang Yunliang, et al. Investigation into synergy in co-gasification of coal and char of biomass by thermogravimetric analysis[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(8): 943—951.
- [7] 王丽红, 柏雪源, 李志合, 等. 两种农业废弃物闪速热解挥发特性实验[J]. 农机化研究, 2006, (2): 96—99.
- [7] Wang Lihong, Bai Xueyuan, Li Zhihe, et al. Volatilization characteristics of two agricultural residues at flash heating rate[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, (2): 96—99.
- [8] 闵凡飞, 张明旭, 陈清如, 等. 新鲜生物质催化气化特性的研究[J]. 林产化学与工业, 2008, 28(3): 28—34.
- [8] Min Fanfei, Zhang Mingxu, Chen Qingru, et al. study on catalytic pyrolysis of fresh biomass[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2008, 28(3): 28—34.
- [9] Diego L F D, Ortiz M, García-Labiano F, et al. Hydrogen production by chemical-looping reforming in a circulating fluidized bed reactor using Ni-based oxygen carriers[J]. Power Sources, 2009, 192(1): 27—34.
- [10] 冉景煜, 禹建功, 秦昌雷, 等. 基于钙基载氧体的核桃壳半焦化学链气化研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(7): 1643—1649.
- [10] Ran Jingyu, Yu Jiangong, Qin Changlei, et al. Study on walnut shell char chemical-looping gasification using CaSO_4 as oxygen carrier[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2016, 37(7): 1643—1649.
- [11] 刘自松, 魏永刚, 李孔斋, 等. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 氧载体用

- 于甲烷化学链燃烧: 负载量与制备方法的影响[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(11): 1384—1392.
- [11] Liu Zisong, Wei Yonggang, Li Kongzhai, et al. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ oxygen carriers for chemical looping combustion of methane: Influence of Fe_2O_3 loadings and preparation methods [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(11): 1384—1392.
- [12] 黄 振, 何 方, 李海滨, 等. 天然铁矿石为氧载体的生物质化学链气化制合成气实验研究[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(3): 300—308.
- [12] Huang Zhen, He Fang, Li Haibin, et al. Synthesis gas generation by chemical-looping gasification of biomass using natural hematite as oxygen carrier [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(3): 300—308.
- [13] 黄 振, 何 方, 赵 坤, 等. 赤铁矿用于生物质化学链气化氧载体的反应性能[J]. 农业工程学报, 2011, 27(s1): 105—111.
- [13] Huang Zhen, He Fang, Zhao Kun, et al. Natural hematite oxygen carriers for chemical-looping gasification of biomass [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(s1): 105—111.
- [14] 迟姚玲. 新型氧载体的制备、表征和性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2002.
- [14] Chi Yaoling. Synthesis, characterization and properties of the new oxygenated complexes [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2002.
- [15] 梅道锋, 赵海波, 马兆军, 等. $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 氧载体制备方法的研究[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(7): 795—802.
- [15] Mei Daofeng, Zhao Haibo, Ma Zhaojun, et al. Preparation method study on $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ oxygen carrier [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(7): 795—802.
- [16] 郭 磊, 赵海波, 马璘晨, 等. 批量制备 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 氧载体及褐煤化学链燃烧实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 57—63.
- [16] Guo Lei, Zhao Haibo, Ma Jinchen, et al. Batch preparation of Fe oxygen carriers for chemical looping combustion of lignite [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(17): 57—63.
- [17] 黄 振, 何 方, 李新爱, 等. Fe基氧载体的生物质化学链气化过程热力学分析及实验研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(11): 1943—1949.
- [17] Huang Zhen, He Fang, Li Xin'ai, et al. Thermodynamic analysis and experimental investigation of chemical looping gasification of biomass with Fe-based oxygen carriers [J]. Acta Energetica Sinica, 2013, 34(11): 1943—1949.
- [18] 刘宝勇, 郭 贞, 郭庆杰, 等. 生物质热解与热解油精制[J]. 中国粉末技术, 2007, 2(3): 39—44.
- [18] Liu Baoyong, Guo Zhen, Guo Qingjie, et al. Pyrolysis of biomass and upgrading of bio-oil [J]. China Powder Science and Technology, 2007, 2(3): 39—44.
- [19] 王高恩, 孙培勤, 孙绍晖, 等. 生物质快速热解制生物油的工艺分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(4): 637—642.
- [19] Wang Gaoen, Sun Peiqin, Sun Shaohui, et al. The technique analysis of biomass fast pyrolysis for production of bio-oil [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(4): 637—642.
- [20] Zheng Jilu, Zhu Xifeng, Guo Qingxiang, et al. Thermal conversion of rice husks and sawdust to liquid fuel [J]. Waste Management, 2006, 26(12): 1430—1435.

EXPERIMENTAL STUDY OF GASIFICATION CHARACTERISTICS OF VACUUM OXYGEN CARRIER OF WHEAT STRAW

Li Chong^{1,2}, Hu Jianjun^{1,2}, Zhang Huan^{1,2}, Li Dun^{1,2}, Guo Qianhui^{1,2}, Liu Xinping¹

(1. Collaborative Innovation Center of Biomass Energy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Key Laboratory of New Materials and Facilities for Rural Renewable Energy,
Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: On the homemade biomass vacuum oxygen carrier gasification reaction device, the influence of the reaction temperature on the gas product distribution and the total content of H₂ and CO in the synthesis gas for the anaerobic carrier was examined, the effect of oxygen carriers on vacuum gasification process of wheat straw was investigated, and the characterization of oxygen carriers before and after the reaction was carried out by means of scanning electron microscopy (SEM). The experimental results show that for the anaerobic carrier, with the increase of reaction temperature, the content of H₂ and CO in the synthesis gas increases gradually, the H₂ content reaches 10.13% at 750 °C, the effect of reaction temperature on CO₂ content is the most significant, when reaction temperature rises from 550 °C to 800 °C, CO₂ content reduces from 27.31% to 14.43%. For the oxygen carrier, in the above reaction temperature range, H₂ content increases from 6.43% to 13.62%, both the H₂/CO value and total content of H₂ and CO in the synthesis gas rise with the increase of temperature. The oxygen carrier can raise content of H₂ and CO in gas product, meanwhile, H₂/CO value also obviously increases, it shows that oxygen carrier can promote gasification reaction of biomass. Under vacuum condition, oxygen carrier is not obviously sintered, and the structure of oxygen carrier after reaction is more beneficial to biomass gasification, but its mechanical strength has decreased.

Keywords: straw; vacuum; oxygen carrier; gasification; temperature