

文章编号:0254-0096(2020)02-0033-08

添加CaO影响生物质流化床高温热解特性的实验研究

司文飞, 王勤辉, 穆合塔尔·斯依提, 方梦祥, 骆仲泐

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 为了研究CaO对生物质高温热解特性的影响,采用小型流化床反应器,在700~850℃下进行CaO质量分数分别为0.5%、10%和20%的木薯秆热解实验,并且分别利用傅氏转换红外光谱(FTIR)和气相色谱-质谱(GC-MS)分析半焦表面官能团和焦油成分。结果表明:CaO会固定半焦中的含氧官能团,从而增加半焦产率;同时,CaO还可降低焦油产率,脱除焦油中的含氧官能团,促进焦油的缩聚反应。另外,CaO可明显提高H₂产率,降低CO₂、CO的产率,改善热解气的品质。

关键词: CaO; 生物质; 热解; 流化床; 高温

中图分类号: TK6

文献标志码: A

0 引 言

生物质能源相比于煤炭等传统能源具有低碳环保、可再生、分布广泛的优势,开发利用生物质能源是我国实现能源可持续发展的一种必然选择。生物质热解气化是生物质转化技术的基础,但热解产生的焦油对于热解气化过程和相关设备危害较大。焦油能量一般占总能量的5%~15%^[1],这部分能量在低温时难以与热解气一起被利用,大部分被浪费。因此,当目标产品不是焦油时,如果能尽可能地减少焦油,可提高能量转化效率,对生物质的高效洁净利用具有重要意义。

热解过程中的焦油产率受原料、热解温度、催化剂和反应器类型等各种因素的影响。以往研究表明,当热解温度足够高(大于500℃)时,随着温度的升高,生物质热解焦油产率不断下降^[2]。朱廷钰等^[3]、贾永斌等^[4]在流化床中考察CaO对煤炭热解特性的影响,认为CaO能有效催化焦油的二次裂解,进而减小焦油产率,但热解温度低于750℃,未涉及高温条件下CaO对热

解特性的影响。周劲松等^[5]采用固定床外催化裂解的方式,研究了白云石(主要成分为MgCO₃和CaCO₃)对焦油催化裂解的影响。Lin Shiyong等^[6]在加压固定床上比较了不同压力下Ca(OH)₂和CaO催化煤热解的效果,结果表明:Ca(OH)₂促进气体生成的作用更强。为了进一步探究高温和CaO对生物质热解特性的影响,本文以木薯秆为热解原料,采用流化床作为热解反应器,考察高温条件下,CaO对生物质热解气、焦油、半焦和热解水的影响。

1 实 验

1.1 实验原料

实验以木薯秆作为原料,粒度为4~8 mm,实验前放入105℃烘箱中干燥12 h。实验用CaO为粉末状分析纯,粒度为0.075~0.100 mm。选用石英砂作为流化床热载体,粒度为0.10~0.18 mm。生物质原料的工业分析和元素分析见表1。

表1 生物质工业分析和元素分析(空气干燥基)

Table 1 Proximate and ultimate analysis of biomass(air dry basis)

工业分析/%,wt				元素分析/%,wt				
M	A	V	FC	[C]	[H]	[N]	[S]	[O]
4.38	2.98	75.92	16.72	48.54	6.10	0.79	0.26	36.95

收稿日期: 2017-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(51661125012)

通信作者: 王勤辉(1969—), 男, 博士、教授, 主要从事煤和生物质的清洁高效利用方面的研究。qhwang@zju.edu.cn

1.2 实验装置和方法

实验所用小型流化床反应器如图 1 所示,流化床炉体内径为 30 mm,高度为 700 mm。该装置主要由流化床主体、供气系统、预热段、电加热和保温系统、给料系统以及气态、液态产物收集系统组成。本实验采用 N_2 作为流化介质,利用数显流量计控制 N_2 流量为 3.5 L/min。

生物质给料量为 20 g, CaO 的添加比例分别为生物质给料量 5%、10% 和 20% (质量分数), 生物质和 CaO 一起通过螺旋给料机一次性给入流化床内。热解温度分别为 700、750、800、850 $^{\circ}C$ 。当床内温度加热到热解温度后,从流化床上部的沙斗一次性加入 150 g 石英砂,然后通 N_2 排空炉内的空气,待温度稳定后,打开给料机开始热解。

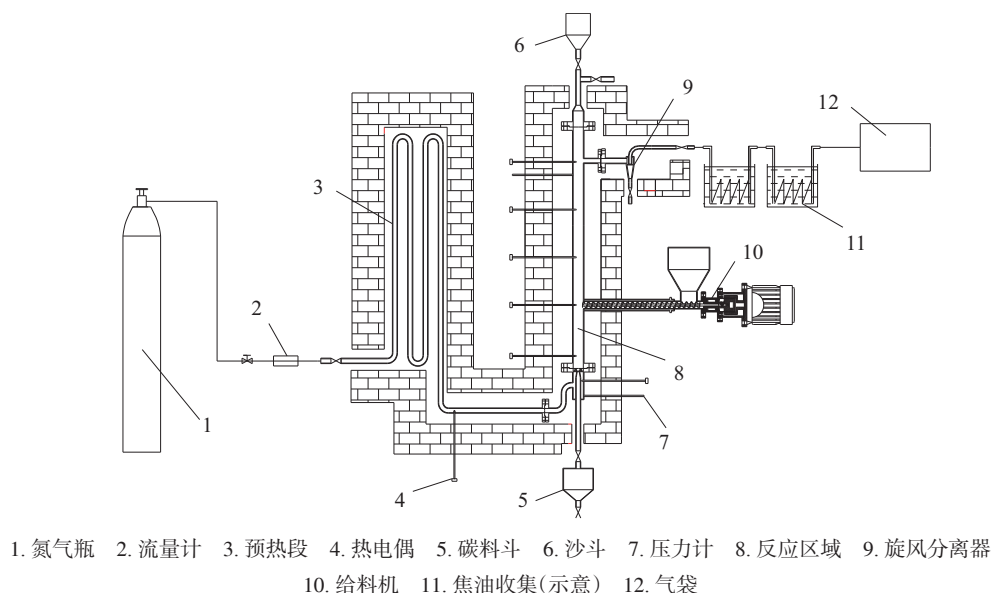


图1 流化床实验装置

Fig. 1 Fluidized bed experimental apparatus

半焦和石英砂由流化床底部的碳料斗收集,在密封条件下冷却至室温,利用 0.25 mm 的筛网分离石英砂与半焦,将筛上粒度大于 0.25 mm 的半焦收集并称量,筛下混在石英砂中的半焦经灼烧后用失重法计量。焦油和热解水由放置在冷阱中的蛇形管收集,冷阱温度设定为 -35 $^{\circ}C$,收集到的液态产物经丙酮溶解后,利用 SF-5 型库伦法卡尔费休测水仪测定丙酮溶液中的水含量,由液态产物质量减去水质量即得到焦油产量。焦油在微型旋转蒸馏仪上切分出 380 $^{\circ}C$ 以下的轻质焦油,用二氯甲烷溶解后利用气相色谱-质谱(GC-MS)检测焦油成分。热解气流经蛇形管冷却后,全部进入铝箔气袋,使用安捷伦 7890A 气相色谱分析气体成分,以 N_2 作为物料衡算气,根据各气体的体积分数计算出各自的产率。

2 实验结果与讨论

2.1 对半焦产率和特性的影响

CaO 和温度对半焦产率的影响曲线如图 2 所示。

随热解温度的升高,半焦产率逐渐减小;相反,半焦产率随 CaO 的增多不断增大。熊园斌等^[7]、伏瑜等^[8]得出了类似的研究结果。如式(1)所示, Ca 作为大分子结构的交联点会固定一部分的大分子碎片,使小分子碎片的形成和释放更加困难,增加半焦产率^[7,9]。此外,潘春鹏等^[10]研究发现, CaO 会催化焦油向半焦转化,这也导致半焦产率增大。

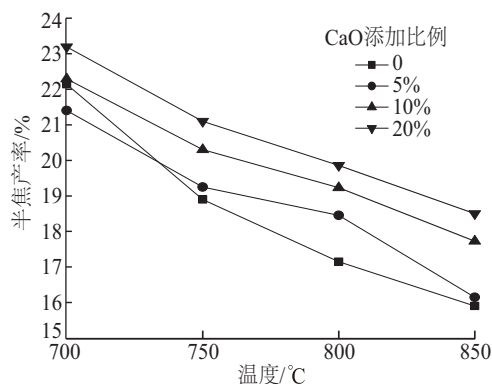
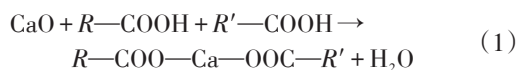


图2 CaO 对半焦产率的影响

Fig. 2 Effect of calcium oxide on char yield



对热解温度为 850 ℃ 的半焦,进行傅氏转换红外光谱(FTIR)分析,谱图如图 3 所示。从各谱峰的出峰位置来看,添加 CaO 前后,2 种半焦的谱图出峰位置基本相同。由于每个吸收峰都是由特定的官能团引起的,这说明添加 CaO 不会改变半焦中官能团的种类。从各谱峰强度来看,在 1100 cm⁻¹ 峰位处,添加 10% CaO 后吸收峰强度明显高于不添加 CaO,其他峰位处吸收峰强度基本相同。根据红外定量分析的朗伯比尔定律,从定性分析的角度来看,FTIR 谱峰的相对强度在某种程度上反映了其所含官能团的浓度^[11]。根据文献[12-13],1100 cm⁻¹ 峰位处的吸收峰是由—O—和 C=O 的伸缩振动造成的。这说明添加 10% CaO 后半焦中—O—和 C=O 等含氧官能团的含量明显高于不添加 CaO,CaO 具有固定—O—和 C=O 等含氧官能团的作用,这在一定程度上证明了反应(1)。

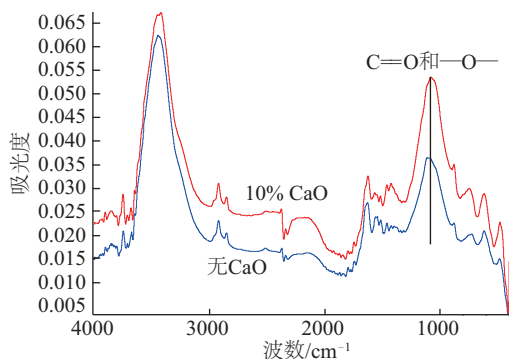


图3 半焦FTIR谱图

Fig. 3 FTIR spectra of char

2.2 对焦油产率和组分的影响

图 4 为不同热解温度下 CaO 添加比例对焦油产率的影响曲线。可以发现:随热解温度的升高和 CaO 添加比例的增大,焦油产率不断减小。CaO 之所以能抑制

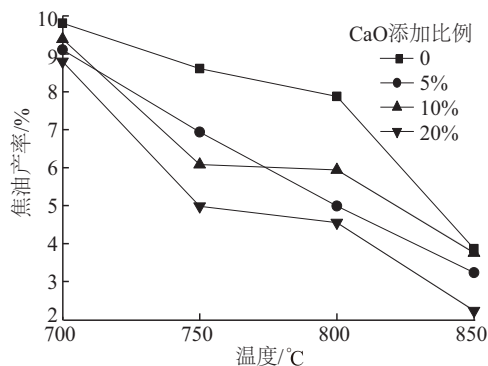


图4 CaO对焦油产率的影响

Fig. 4 Effect of calcium oxide on tar yield

焦油的生成,原因为:1)CaO 颗粒表面具有极性活化位,而焦油中含有许多具有负电性 π 电子体系的稠环化合物,它们在活化位上被吸附后, π 形电子云被破坏而失去稳定性,使 C—H 键和 C—C 键的断裂容易发生,从而促进了焦油的二次裂解^[5,14];2)如 2.1 节所述,Ca 作为大分子结构的交联点固定了一部分可能以焦油形式释放的大分子碎片,从而减小了焦油产率。

将 800 ℃ 下的热解焦油切分成重质焦油和轻质焦油,实验结果为:不添加 CaO 的轻质和重质焦油产率分别为 4.03% 和 3.85%;添加 20% CaO 后,轻质和重质焦油的产率分别减为 2.76% 和 3.18%。可以发现,轻质焦油产率减小尤为显著,说明 CaO 对轻质焦油的催化作用明显强于重质焦油。对轻质焦油进行 GC-MS 分析,测定焦油组分和各组分相对含量,结果见表 2。表 2 中芳香烃包括甲基萘、萘、茚、芘和蒽等多环芳香烃;脂肪烃是指环烷烃和 C8~C34 直链烷烃;含氧芳香族化合物包括苯酯、甲基苯酚和苯酚等;醛类是指二甲基苯甲醛;杂原子化合物包含吡啶、吡啶、喹啉和咪唑等。由表 2 可知,添加 20%CaO 后,醛的相对含量由 23.55% 减为零,总含氧有机化合物(含氧芳香族化合物+醛)含量减小,这说明 CaO 能减少轻质焦油中的含氧官能团。林郁郁等^[15]同样发现 CaO 能脱除焦油中的氧。另外,添加 20% CaO 后,轻质焦油中芳香烃相对含量有所增大,这是因为高温下 Ca 能促进大分子自由基的缩聚反应^[16]。此外,不添加 CaO 的轻质焦油中未检测到芘和蒽,而添加 CaO 的轻质焦油中却发现了芘和蒽等大分子芳香烃,这也可以证明 CaO 能促进缩聚反应的发生。

表2 轻质焦油各组分相对含量百分比

Table 2 Relative contents in percentage of components in light tar

焦油组分	CaO 添加比例/%	
	0	20
芳香烃/%	7.81	19.13
脂肪烃/%	53.75	56.04
含氧芳香族化合物/%	8.83	11.95
醛/%	23.55	—
杂原子化合物/%	6.06	12.88

2.3 对气体产率和组分的影响

图 5 为不同热解温度下 CaO 添加比例对热解气产率的影响曲线。由图 5 可看出:随热解温度的升高,热解气产率逐渐增大;添加 CaO 后,热解气产率总体上有所减小,但当 CaO 添加比例从零增加到 5% 时,气体产

率变化不大。本结果与以往在较低温度下 CaO 能增大气体产率的结论相反, 原因为: 1) 前述 Ca 对大分子的固定作用, 抑制了气体的进一步释放; 2) 高温促进了 CaO 对焦油的脱氢活性, 使焦油生成焦的趋势迅速增大, 从而降低了生成的气体产率^[17]。此时, 虽然存在焦油的二次分解反应, 但不足以抵消上述因素对热解气生成的抑制效果。

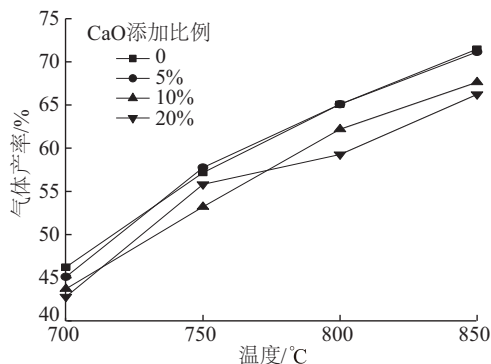


图5 CaO对气体产率的影响

Fig. 5 Effect of calcium oxide on gas yield

图6~图10分别为不同热解温度下 CaO 添加比例对各热解气组分的影响曲线。由图6可发现, H_2 产率和体积分数的变化趋势相同, 添加 CaO 和升温均能促进 H_2 的生成。这与朱廷钰等^[3]、贾永斌等^[4]和陈翀等^[18]的研究结果一致, 与低温下 H_2 主要来源于脂肪烃类的裂解反应不同, 高温下芳香烃的缩聚反应成为 H_2 的主要来源^[4]。添加 CaO 促进 H_2 生成的主要原因是高温下 CaO 能促进芳香化合物的缩聚反应, 从而释放出更多的氢自由基。

由图7a可看出, 添加 CaO 会小幅减小 CO 产率。韩龙等^[19]利用 TG-FTIR 研究 CaO 对麦秆热解特性的影响, 同样发现 CaO 能抑制 CO 的生成。CO 主要来源于含氧杂环化合物、羰基化合物和酚类化合物的裂解^[4], 反应(1)中 Ca 对—O—和 C=O 等含氧官能团的固定作用是 CO 产率减小的主要原因, 但由表2可知, CaO 催化轻质焦油中羰基等含氧官能团的裂解, 能补偿部分 CO, 所以最终 CO 产率减小并不显著。由图7b可知, 700~800 °C 范围内, CO 体积分数随温度的升高而减小, 在 850 °C 时有所升高。不同 CaO 添加比例下, CO 体积分数的顺序为: 5% > 0% > 10% > 20%。由图8可知, CO_2 产率与温度呈正相关, CaO 会抑制 CO_2 的生成。 CO_2 体积分数先随温度的升高而增大, 当温度高于 800 °C 时体积分数开始减小。 CO_2 主要来源于羧基官能团的裂解^[4], 与 CO 类似, Ca 作为大分子的交联点固定了羧基等含氧官能团是 CO_2 产率减小的主要原因。

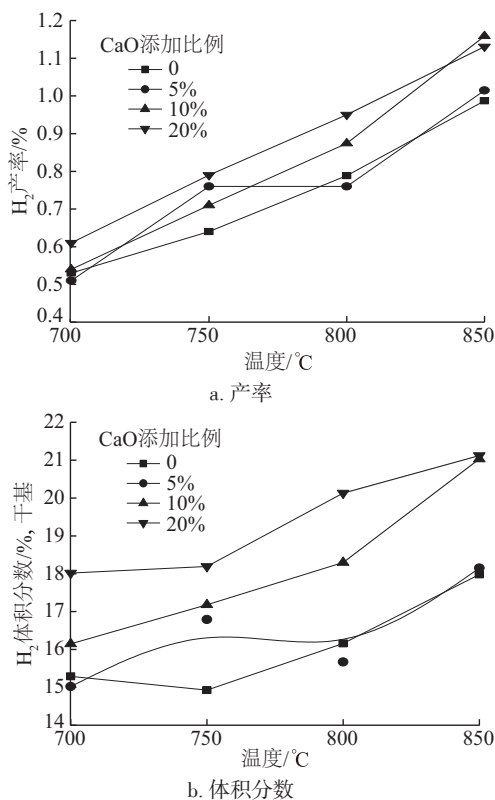
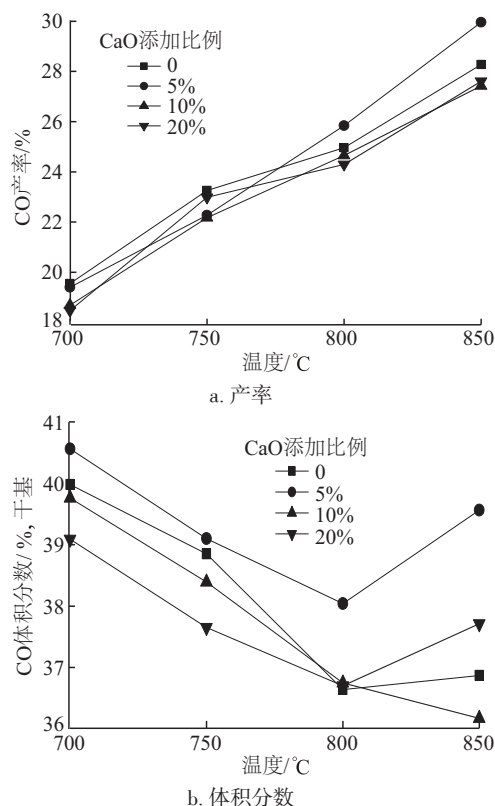
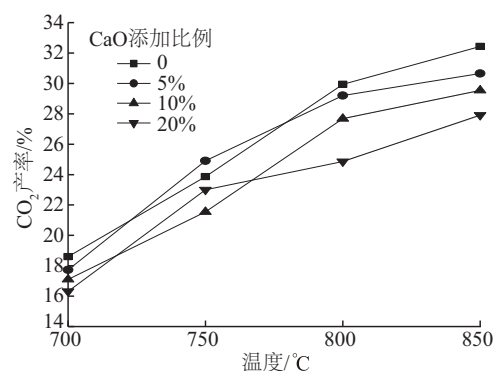
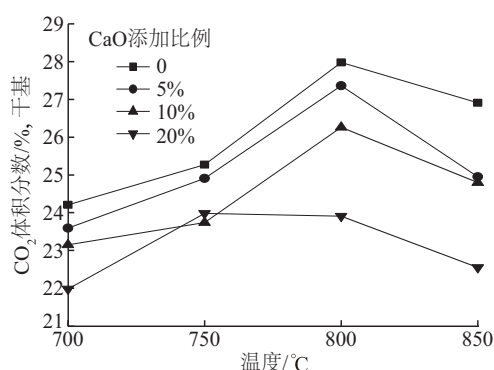
图6 CaO对 H_2 产率和体积分数的影响Fig. 6 Effect of calcium oxide on H_2 yield and volume fraction

图7 CaO对CO产率和体积分数的影响

Fig. 7 Effect of calcium oxide on CO yield and volume fraction



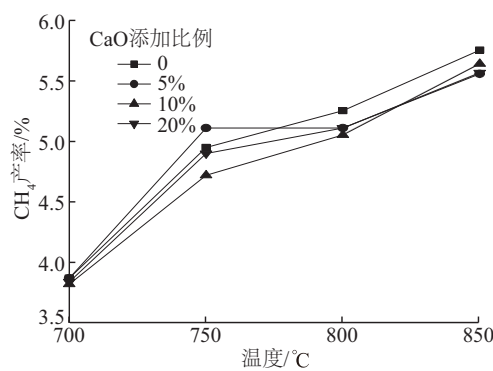
a. 产率



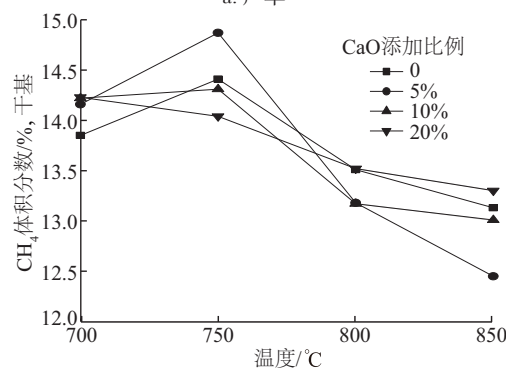
b. 体积分数

图8 CaO对CO₂产率和体积分数的影响Fig. 8 Effect of calcium oxide on CO₂ yield and volume fraction

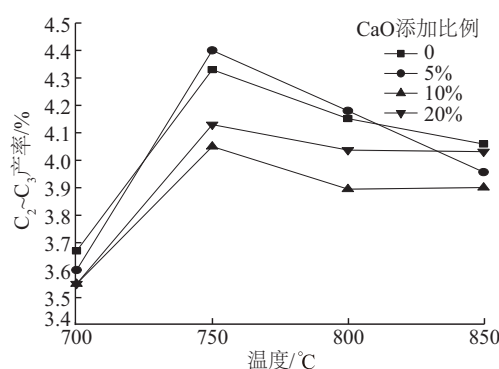
由图9a可知,在700℃时,CaO对CH₄产率几乎无影响,温度高于700℃后,添加CaO使CH₄产率减小。熊园斌等^[7]研究发现,当温度达到800℃时,CaO会减小CH₄产率。贾永斌等^[4]发现当温度低于700℃时,CaO能促进CH₄的生成,但当温度升至750℃时,CaO会抑制CH₄的生成。热解过程中CH₄主要来源于脂肪烃中甲基的断裂^[4,20],当温度高于700℃时,CaO对甲基的脱氢作用很强烈,导致甲基数量大幅减少。由表2还可发现,高温下CaO会加剧轻质焦油中脂肪烃的芳香化,从而使甲基更难析出,所以添加CaO使CH₄产率减小。由图9b可知,温度超过750℃后,CH₄体积分数呈下降趋势。添加CaO同样会减小CH₄体积分数,但在700℃时相反。如图10a所示,CaO会抑制C₂~C₃(包含C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆和C₃H₈)的生成;当温度超过750℃后,C₂~C₃产率随温度升高不断减小。贾永斌等^[4]认为高温下焦油中转化成半焦的部分增大是C₂~C₃产率减小的原因。笔者认为温度高于750℃后,长链脂肪烃的缩聚反应加剧,致使长链脂肪烃更容易缩聚成稠环芳香烃,使碳链更难断裂,进而造成C₂~C₃的减少。如图10b所示,升高温度和添加CaO均能减小C₂~C₃的体积分数。



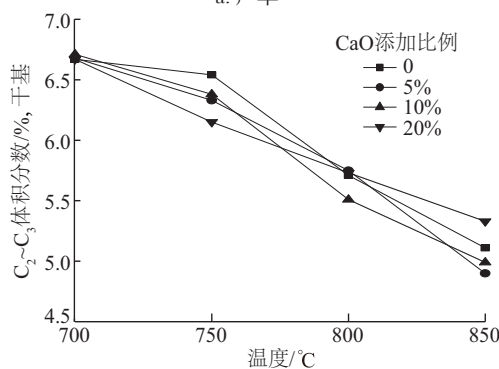
a. 产率



b. 体积分数

图9 CaO对CH₄产率和体积分数的影响Fig. 9 Effect of calcium oxide on CH₄ yield and volume fraction

a. 产率



b. 体积分数

图10 CaO对C₂~C₃产率和体积分数的影响Fig. 10 Effect of calcium oxide on C₂~C₃ yield and volume fraction

综上所述,添加 CaO 后,热解气中 CO_2 和 CO 含量减小, H_2 含量增大, CH_4 含量虽有小幅减小,但 H_2 与 CO 的比值增大,热解气的品质提高。

2.4 对水产率的影响

不同热解温度下 CaO 添加比例对热解水产率的影响曲线如图 11 所示。添加 CaO 后,热解水产率有所增大,熊园斌等^[7]认为这与反应(1)生成额外的水有关^[7]。随热解温度的升高,热解水产率呈减小趋势,朱廷钰等^[3]也得出了类似结论,陈勋瑜等^[21]认为温度高于 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 后,热解水的消耗与生成同时存在。笔者认为热解温度越高,水蒸气的气化反应越剧烈,导致热解水的生成量小于消耗量,因此水产率随温度的升高而减小。

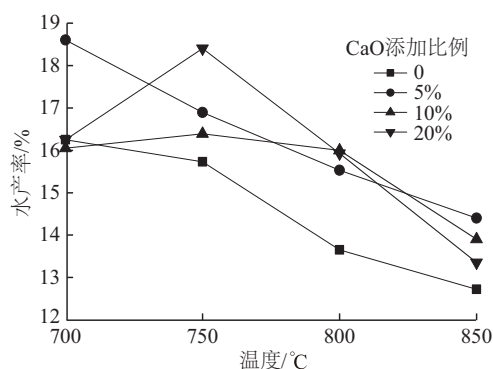


图 11 CaO 对水产率的影响

Fig. 11 Effect of calcium oxide on water yield

3 结 论

本文利用小型流化床反应器,研究高温下, CaO 对木薯秆热解产物的影响,主要结论如下:

1) 高温条件下, CaO 仍能有效减少热解焦油,能够促进焦油的缩聚反应,同时可脱除焦油中的羰基等含氧官能团。CaO 对轻质焦油的催化作用明显强于重质焦油。

2) 升温仍是增大热解气产率的主要手段。添加 CaO 能促进 H_2 的生成,但同时减小 CH_4 、 $\text{C}_2\sim\text{C}_3$ 脂肪烃、 CO_2 和 CO 产率,导致总热解气产率减小,但能改善热解气品质。另外,添加 CaO 还会增大热解水的水产率。

3) 在不同的 CaO 添加比例下,半焦产率均随温度的升高而减小。添加 CaO 能显著增大半焦的产率,主要因为 CaO 固定了半焦中的含氧官能团。

[参考文献]

[1] 马隆龙, 吴创之, 孙立. 生物质气化技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

MA L L, WU C Z, SUN L. Biomass gasification technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.

[2] 典平鸽, 张乐观, 江程程. 裂解温度对生物质热解焦油成分的影响[J]. 可再生能源, 2012, 30(5): 54-58.

DIAN P G, ZHANG L G, JIANG C C. The influence of pyrolysis temperature on the component of biomass pyrolytic tar[J]. Renewable energy resources, 2012, 30(5): 54-58.

[3] ZHU T Y, ZHANG S Y, HUANG J J, et al. Effect of calcium oxide on pyrolysis of coal in a fluidized bed[J]. Fuel processing technology, 2000, 64(1): 271-284.

[4] JIA Y B, HUANG J J, WANG Y. Effects of calcium oxide on the cracking of coal tar in the freeboard of a fluidized bed[J]. Energy and fuels, 2004, 18(6): 1625-1632.

[5] 周劲松, 王铁柱, 骆仲决, 等. 生物质焦油的催化裂解研究[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(2): 144-148.

ZHOU J S, WANG T Z, LUO Z Y, et al. Catalytic cracking of biomass tar[J]. Journal of fuel chemistry and technology, 2003, 31(2): 144-148.

[6] LIN S Y, HARADA M, SUZUKI Y, et al. Comparison of pyrolysis products between coal, coal/CaO, and Coal/Ca(OH)₂ materials[J]. Energy and fuels, 2003, 17(3): 602-607.

[7] 熊园斌, 王勤辉, 杨玉坤, 等. 碳酸钙对煤热解特性影响的实验研究[J]. 热力发电, 2016, 45(1): 14-19.

XIONG Y B, WANG Q H, YANG Y K, et al. Experimental study on influence of calcium carbonate on coal pyrolysis behaviors[J]. Thermal power generation, 2016, 45(1): 14-19.

[8] FU Y, GUO Y H, ZHANG K X. Effect of three different catalysts (KCl, CaO, and Fe_2O_3) on the reactivity and mechanism of low-rank coal pyrolysis[J]. Energy & fuels, 2016, 30(3): 2428-2433.

[9] 赵洪宇, 李玉环, 舒元峰, 等. CaO 对褐煤和无烟煤热解产物分布及煤焦结构的影响[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 177-183.

ZHAO H Y, LI Y H, SHU Y F, et al. Effect of calcium oxide on pyrolysis products distribution and char structure of lignite and anthracite[J]. Coal science and technology, 2016, 44(3): 177-183.

[10] 潘春鹏, 陈翀, 黄群星, 等. 添加 CaO 对生物质热解焦油生成的影响研究[J]. 热力发电, 2012, 41(8): 18-23.

PAN C P, CHEN C, HUANG Q X, et al. Experimental study on influence of CaO addition on tar generation

- during biomass pyrolysis[J]. Thermal power generation, 2012, 41(8): 18-23.
- [11] 李庆钊, 林柏泉, 赵长遂, 等. 基于傅里叶红外光谱的高温煤焦表面化学结构特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(32): 46-52.
- LI Q Z, LIN B Q, ZHAO C S, et al. Chemical structure analysis of coal char surface based on Fourier-transform infrared spectrometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(32): 46-52.
- [12] 石金明, 孙路石, 向军, 等. 兖州煤气化半焦表面官能团特征试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(5): 17-22.
- SHI J M, SUN L S, XIANG J, et al. Experimental study on surface functional groups characteristics of Yanzhou semi-cokes of gasification[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(5): 17-22.
- [13] 朱红, 李虎林, 欧泽深, 等. 不同煤阶煤表面改性的FTIR谱研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 366-370.
- ZHU H, LI H L, OU Z S, et al. Study on surface modification of different rank coals by using FTIR[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(4): 366-370.
- [14] 朱廷钰, 刘丽鹏, 王洋, 等. CaO催化煤温和气化研究[J]. 燃料化学学报, 2000, 28(1): 36-39.
- ZHU T Y, LIU L P, WANG Y, et al. Study on coal mild gasification with CaO catalyst[J]. Journal of fuel chemistry and technology, 2000, 28(1): 36-39.
- [15] 林郁郁, 张楚, 章明川, 等. CaO伴随生物质热裂解制油同时脱氧的小型流化床实验研究[J]. 燃料化学学报, 2011, 39(3): 182-188.
- LIN Y Y, ZHANG C, ZHANG M C, et al. Investigation on direct deoxygenation of bio-oil during biomass fast pyrolysis with CaO in a fluidized bed reactor[J]. Journal of fuel chemistry and technology, 2011, 39(3): 182-188.
- [16] ZOU X W, YAO J Z, YANG X M, et al. Catalytic effects of metal chlorides on the pyrolysis of lignite[J]. Energy and fuels, 2007, 21(2): 619-624.
- [17] 贾永斌, 黄戒介, 王洋. CaO在流化床稀相段对焦油裂解的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 552-556.
- JIA Y B, HUANG J J, WANG Y. Influence of calcium oxide on tar cracking in freeboard of fluidized bed[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 552-556.
- [18] CHEN C, JIN Y Q, CHI Y. Effects of moisture content and CaO on municipal solid waste pyrolysis in a fixed bed reactor[J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2014, 110(1): 108-112.
- [19] HAN L, WANG Q H, MA Q, et al. Influence of CaO additives on wheat-straw pyrolysis as determined by TG-FTIR analysis[J]. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2010, 88(2): 199-206.
- [20] SOLOMON P R, HAMBLIN D G, CARANGELO R M, et al. General model of coal devolatilization[J]. Energy and fuels, 1988, 2(4): 405-422.
- [21] 陈勋瑜, 王勤辉, 岑建孟, 等. 温度对小龙潭褐煤流化床热解产物影响的试验研究[J]. 动力工程学报, 2011, 31(4): 316-320.
- CHEN X Y, WANG Q H, CEN J M, et al. Effect of temperature on pyrolysis products of Xiaolongtan lignite in a fluidized-bed reactor[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(4): 316-320.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON EFFECT OF CALCIUM OXIDE ON BIOMASS HIGH-TEMPERATURE PYROLYSIS IN FLUIDIZED BED

Si Wenfei, Wang Qinhui, Muhetaer · Siyiti, Fang Mengxiang, Luo Zhongyang

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to investigate the effect of calcium oxide on biomass high-temperature pyrolysis characteristics, cassava straw high-temperature pyrolysis experiments with different amount (0, 5%, 10%, 20%) of calcium oxide were carried out in a fluidized bed, under the temperature range from 700 °C to 850 °C. FTIR was used to analyze the functional groups of char, and the components of tar was analyzed by GC-MS. The results show that calcium oxide can fix a few oxygen-containing functional groups in the char, thus increased the char yield. At the same time, the yield of tar was decreased with the addition of calcium oxide, it may conclude that calcium oxide can reduce the amount of oxygen-containing functional groups in the tar, promoting the condensation polymerization reaction. The addition of calcium oxide can apparently raise the yield of H₂, reduce the yield of CO₂ and CO, and improve the quality of pyrolysis gas.

Keywords: calcium oxide; biomass; pyrolysis; fluidized beds; high-temperature