

生物质气化特性研究及焓分析

张小桃¹, 黄明华¹, 王爱军¹, 张燕¹, H. Arellano-Garcia², G. Wozny²

(1. 华北水利水电学院电力学院, 郑州 450011; 2. 柏林工业大学过程科学系, 柏林 10623)

摘要: 为了提高生物质能的利用效率以及生物质气化合成气的品质, 基于 AspenPlus 模拟平台, 以松木、玉米秸秆和木屑为气化原料, 对生物质气化特性进行了研究并对气化过程进行了焓分析。计算了空燃比为 0.7~2.3、生物质含水率为 30% 条件下的气化炉运行温度、合成气低位热值和焓效率等主要气化过程性能指标, 并通过提高气化剂温度、干燥生物质原料等方法对生物质气化过程进行了优化分析。结果表明, 生物质种类及其含水率对气化过程性能有较大的影响; 降低生物质含水率、提高气化剂温度有利于提高气化过程的焓效率和合成气低位热值。

关键词: 生物质, 气化, 优化, 焓效率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.048

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-02-0282-05

张小桃, 黄明华, 王爱军, 等. 生物质气化特性研究及焓分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 282-286.

Zhang Xiaotao, Huang Minghua, Wang Aijun, et al. Characteristics of biomass gasification and exergy analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 282-286. (in Chinese with English abstract)

0 引言

生物质气化可将低品位的固体生物质原料转化为高品位的洁净气体燃料, 代替化石燃料用于发电、供热, 或作为生产化工产品原料^[1]。Ptasinski KJ 等^[2]研究了有机污泥的气化, 指出气化炉是整个气化工序效率最低的操作单元, 生物质气化技术推广的关键是气化炉的高效运行和商业化。Rodrigues M 等^[3]分析了常压气化炉产生的低热值气体的主要应用技术。Ptasinski KJ 等^[4]通过比较不同生物质燃料气化过程, 分析了气化焓效率。张巍巍和陈汉平等^[5-6]基于 AspenPlus 软件模拟平台对生物质气化过程进行模拟计算, 气化模型能准确地模拟实际气化过程, 具有较好的可靠性和适用性。利用焓分析方法对气化过程进行分析和过程优化研究, 目前此方面的研究并不多。

通过生物质气化特性研究和焓分析可以得到不同运行工况下气化炉的最佳运行条件; 可以通过干燥生物质^[7]和提高气化剂温度, 优化气化过程, 提高气化过程的焓效率以及合成气的品质。本研究工作拟为生物质能的开发利用以及提高合成气的品质提供理论依据。

1 气化炉模型及气化过程焓效率

1.1 气化模型的建立

鉴于生物质气化研究中涉及大量横跨动力过程和化

工过程的特殊设备, 本文选择 ASPEN 流程模拟软件对生物质气化过程进行了数值模拟。用到的主要反应模块为 RYield 和 RGibbs^[8-9], 气化模型如图 1 所示。气化炉压力为 0.1 MPa, 空气温度为 25℃, 气化炉出口合成气成分以及运行温度随着气化炉入口空燃比(空气质量与生物质燃料质量比)的变化而变化。

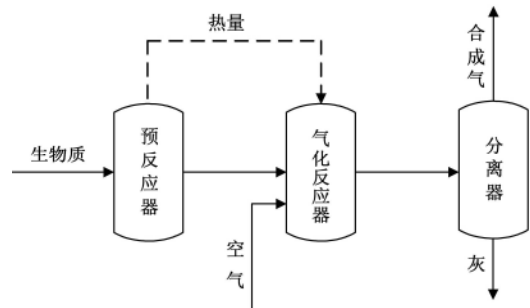


图 1 生物质气化过程模型简图

Fig.1 Simplified model scheme of biomass gasification process

1.2 气化过程焓分析及其性能指标

焓方法是以热力学第一、第二定律为基础的做功能方法, 它从能量利用的数量和质量 2 个方面来评价能量转化过程^[10]。图 2 为生物质气化过程的焓流图。

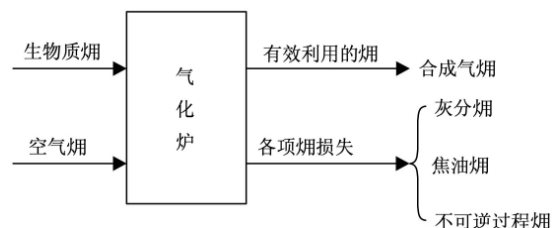


图 2 气化过程物质及焓流图

Fig.2 Exergy flow graph of gasification process

收稿日期: 2010-09-24 修订日期: 2011-01-10

基金项目: 郑州市科技发展计划(074SCCG32108-5); 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2011A520028)

作者简介: 张小桃(1967-), 女, 河南省温县人, 副教授, 博士, 主要从事能源开发与利用研究。郑州 华北水利水电学院, 450011。

Email: zxt@ncwu.edu.cn

输入气化炉的物质包括生物质和空气，输出为合成气、灰分和焦油。输入气化炉的烟包括生物质的烟和空气的烟，输出包括合成气烟，未完全气化的焦油烟、灰分烟以及不可逆过程的烟。当只考虑合成气的开发利用时，即气化炉的主要产品是合成气时，合成气的烟为有效利用的烟，气化炉烟效率的计算公式为

$$\eta_{ex} = \frac{E_{syngas}}{E_{biomass} + E_{air}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， η_{ex} 为气化炉烟效率，%； E_{syngas} 为气化炉出口合成气的烟，kJ； $E_{biomass}$ 为气化炉入口生物质烟，kJ； E_{air} 为气化炉入口空气的烟，kJ。

高温合成气的热烟主要包括合成气的化学烟和物理烟，其计算公式为

$$E_{syngas} = E_{ph} + E_{ch} \quad (2)$$

式中， E_{ph} 为物理烟，kJ； E_{ch} 为化学烟，kJ。

基于环境温度和压力，合成气和空气的物理烟计算公式为

$$\varepsilon_{ph} = (H - H_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

式中， ε_{ph} 为单位摩尔物质流的物理烟，kJ/mol； H 和 s 为单位摩尔物质流的焓和熵，kJ/mol 和 kJ/(mol·K)； T_0 为环境温度，K； H_0 和 s_0 为在环境温度下单位摩尔物质流的焓和熵，kJ/mol 和 kJ/(mol·K)。

对于气体，摩尔物质流的化学烟的计算公式为

$$\varepsilon_{ch, gas} = \sum_i x_i \varepsilon_{0i} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (4)$$

式中， $\varepsilon_{ch, gas}$ 为单位摩尔物质流的化学烟，kJ/mol； ε_{0i} 为标准单位摩尔物质流的化学烟，kJ/mol； R 为理想气体常数，8.314 J/(mol·K)。

根据文献[11]，生物质烟可以通过下式计算得到

$$\varepsilon_{biomass} = \beta(LHV_{biomass} + L \cdot M / 100) \quad (5)$$

$$\beta = f(H/C, O/C) \quad (6)$$

式中， β 为生物质烟与生物质低位热值之间的转换系数，与固体生物质各成分含量有关； $LHV_{biomass}$ 为生物质收到基的低位热值，kJ/kg； L 为水蒸气的蒸发焓，kJ/kg； M 为生物质收到基含水率，%； H/C 和 O/C 为生物质元素分析的各成分比率。其中生物质高位热值及低位热值 (MJ/kg) 的计算公式^[12]如下

$$HHV_{biomass} = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.0151N - 0.1034O - 0.0211ASH \quad (7)$$

$$LHV_{biomass} = HHV_{biomass} (1 - M / 100) - 2.447 \cdot M / 100 - 22.047 \cdot H / 100 \cdot (1 - M / 100) \quad (8)$$

式中， $HHV_{biomass}$ 为生物质干燥基的高位热值，MJ/kg； C 、 H 、 S 、 N 、 O 和 ASH 为生物质干燥基的碳、氢、氧、氮、硫和灰分的质量分数，%。

合成气的低位热值由以下公式^[13]计算

$$LHV_{syngas} = 126CO + 108H_2 + 359CH_4 + 665C_nH_m \quad (9)$$

式中， LHV_{syngas} 为气体低位热值，kJ/Nm³； CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_nH_m 为合成气中各气体的体积分数，%。

1.3 生物质的选取

中国是一个农业大国，农业废弃物资源分布广泛，

其中农业秸秆年产量超过 6 亿 t，可作为能源用途的秸秆 3.5 亿 t，约折合 1.5 亿 t 标准煤；薪炭林和林业及木材加工废弃物的资源总量相当于 2 亿 t 标准煤^[14]。初步估算，全国每年可利用生物质能源总量约 5 亿 t 标准煤。本文选取了有代表性的生物质：松木、玉米秸秆和木屑作为气化原料。为了方便比较，生物质原料的工业分析和元素分析均采用干燥基^[15]。如表 1 所示。

表 1 生物质原料的工业分析和元素分析 (质量分数) 和热值 (干燥基)

生物质原料	松木	玉米秸秆	木屑	
工业分析	固定碳/%	14.98	18.56	3.60
	挥发分/%	84.21	75.24	96.1
	灰分/%	0.81	6.20	0.30
元素分析	C/%	51.88	46.85	42.03
	H/%	5.75	5.60	5.36
	O/%	38.48	40.45	52.09
	N/%	0.20	0.78	0.17
	S/%	0	0.12	0.05
	灰分/%	0.81	6.20	0.30
高位热值/(kJ·kg ⁻¹)	20 883.99	18 636.06	15 596.06	

2 气化过程性能分析

运用 AspenPlus 软件所建气化模型分别对含水率为 30% 的松木、玉米秸秆和木屑气化过程进行模拟。得到气化炉主要性能指标随空燃比的变化情况。论文主要分析合成气低位热值和烟效率的变化。

2.1 合成气低位热值

合成气低位热值随空燃比的变化如图 3 所示，合成气低位热值随空燃比的增大而下降，且松木气化的合成气低位热值始终最大，玉米秸秆次之，木屑气化的合成气低位热值最小。因为随着空燃比的增加，CO、H₂、CH₄ 与 O₂ 反应生成 CO₂ 和 H₂O，从而使得合成气中可燃气成分下降，热值随之降低。

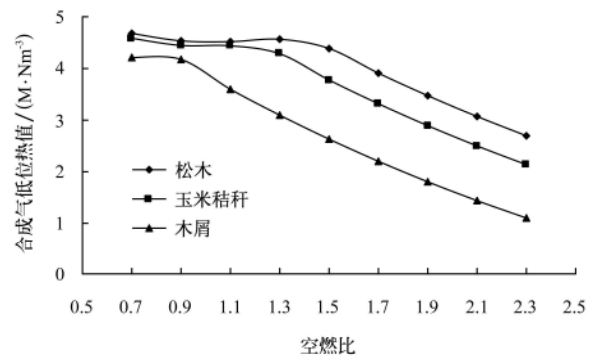


图 3 合成气低位热值随空燃比的变化

Fig.3 Changes of syngas LHV vs. air/biomass mass ratios

2.2 烟效率

气化炉烟效率随空燃比的变化，如图 4 所示，松木、玉米秸秆和木屑气化最大烟效率分别为 71.1%、69.9%和

63.2%，对应的空燃比分别为 1.5、1.3 和 0.9。在焓效率最大时对应的空燃比下，松木、玉米秸秆和木屑气化操作参数为最佳气化参数。更多的氧气加入会使合成气中可燃成分燃烧，气化炉出口合成气热值降低，甚至生物质原料在气化炉内进行完全燃烧，导致焓效率降低。

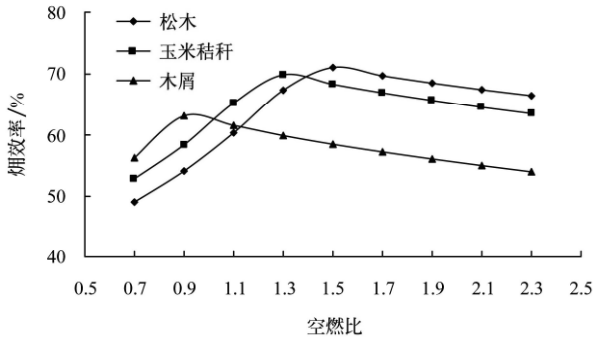


图 4 焓效率随空燃比的变化

Fig.4 Changes of exergy efficiency vs. air/biomass mass ratios

2.3 最佳气化参数

当气化炉焓效率最大时，含水率 30%的松木、玉米秸秆和木屑气化的气化参数，即气化炉最佳运行参数如

表 2 所示。结果表明，高热值的生物质原料气化在较高温度下达到最佳运行参数；高热值的生物质原料气化性能指标优于低热值的生物质原料的气化性能指标。

表 2 生物质原料最佳气化参数

Table 2 Optimal gasification parameters of biomass feedstock

原料	空燃比	气化炉运行温度/ ℃	合成气低位热值/ (MJ·Nm ⁻³)	焓效率/ %
松木	1.5	627	4.38	71.06
玉米秸秆	1.3	601	4.29	69.87
木屑	0.9	544	4.18	63.15

3 过程优化

为了得到更好的气化效果，采取提高气化剂温度和干燥生物质原料等方法对气化过程进行优化。优化前气化剂空气的温度为环境温度 25℃，生物质原料含水率为 30%。3 种优化方法分别为：方法（一），将空气温度提高到 250℃后再通入气化炉；方法（二），干燥生物质原料使其含水率为 10%后进行气化；方法（三），干燥生物质原料使其含水率为 10%并加热空气温度到 250℃。如图 5 所示。

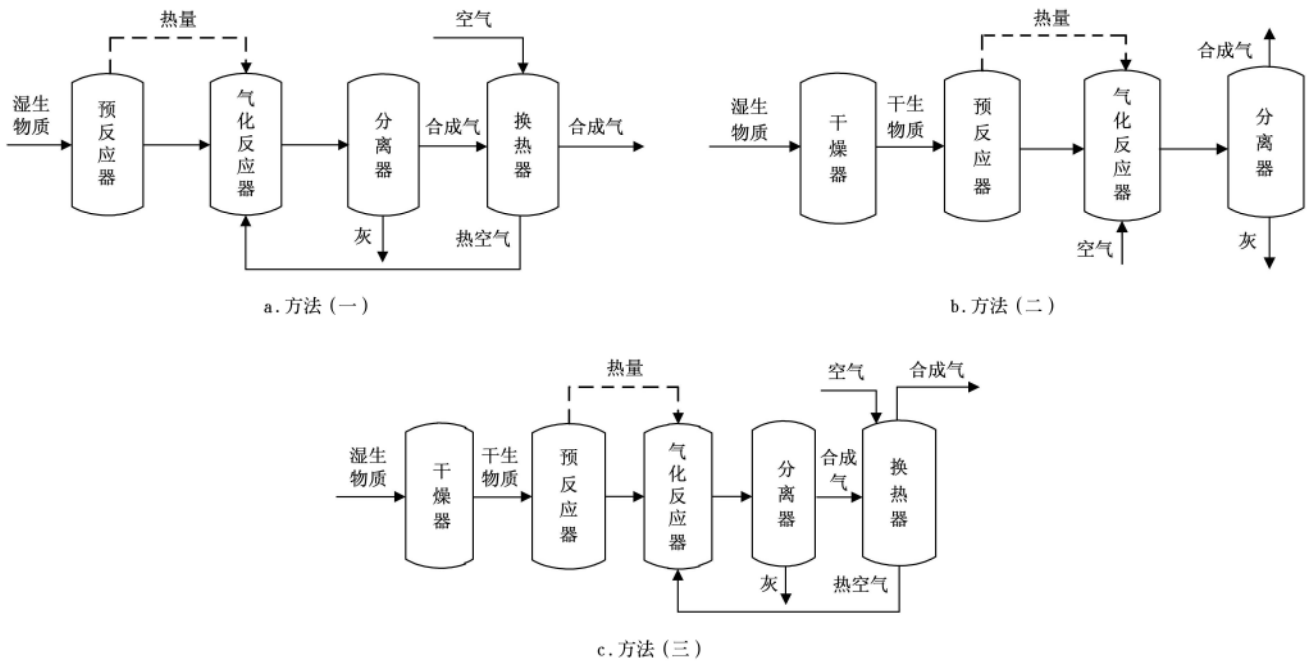


图 5 生物质气化过程优化方法

Fig.5 Optimization methods of biomass gasification process

3.1 提高气化剂温度

提高气化剂温度后，气化过程焓效率随空燃比的变化如图 6a 方法（一）所示，松木、玉米秸秆和木屑分别在空燃比小于 1.5、1.3 和 0.9 时焓效率得到提高。优化后，松木气化最大焓效率 71.1%，玉米秸秆气化的最大焓效率 69.9%，木屑气化最大焓效率 63.47%。这说明提高气化剂温度在较低空燃比下使气化过程得到优化，焓效率提高，这是因为通过预热空气可以大幅提高气化炉温度，使气化反应加剧，有利于 H₂ 浓度的升高，同时炉温升高

还导致 CO₂ 还原 CO 反应增强^[15]，有效气体成分增加使焓效率提高。然而在较高空燃比下，差别却不大，因为过量的氧气通入使气化生成的可燃气体燃烧，焓效率降低。

3.2 干燥生物质原料

干燥生物质原料后，气化过程焓效率随空燃比的变化如图 6b 方法（二）所示，干燥后在较小空燃比下焓效率小于干燥前焓效率，随着空燃比的增大干燥后焓效率逐渐大于干燥前焓效率并形成稳定增大趋势。干燥后，

松木气化最大焓效率为空气比为 1.9 时所对应的焓效率 73.73%；玉米秸秆气化的最大焓效率为空气比为 1.7 时所对应的焓效率 72.33%。木屑的最大焓效率为空气比为 1.3 时所对应的焓效率 65.12%。结合式 (3) 和 (5) 可以发现干燥生物质原料后，生物质焓变大空气焓不变，而在相对小空燃比下优化前后输出的合成气焓变化不大，结合式 (1) 得到干燥后焓效率减小。由于生物质原料水分的减少，导致气化炉温度升高，合成气中有效气体成分的逐渐增加使焓效率慢慢提高，最终大于优化前焓效率并形成稳定的增大趋势。

3.3 干燥生物质原料并提高气化剂温度

干燥生物质原料并提高气化剂温度后，气化过程焓效率随空燃比的变化如图 6c 方法 (三) 所示。提高气化剂温度弥补了在较低空燃比下焓效率低的缺点，干燥生物质原料则使在相对高空燃比下焓效率依然能得到提高。优化后松木、玉米秸秆和木屑的最大焓效率分别为 74.59%、73.42% 和 65.14%。

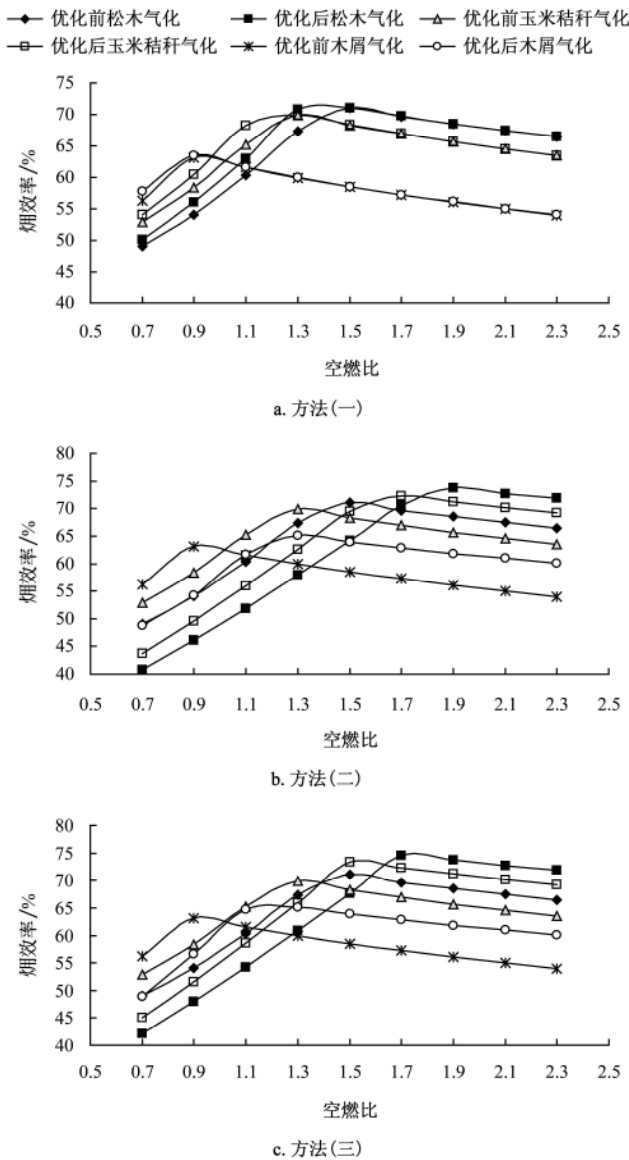


图 6 优化前后焓效率随空燃比的变化
Fig.6 Changes of exergy efficiency of before and after optimization vs. air/biomass mass ratios

3.4 结果分析

方法(一)将空气温度提高到 250℃后再通入气化炉，优化后使焓效率在较小空燃比下得到明显提高；方法(二)干燥生物质原料使其含水率为 10%，优化后使焓效率在相对高空燃比下得到明显提高，最大焓效率大于方法(一)优化后的最大焓效率，焓效率最大时对应的气化最佳空燃比也大于方法(一)优化后的最佳空燃比；方法(三)干燥生物质原料使含水率为 10%并加热空气温度到 250℃，优化后，既改善了低空燃比下焓效率不高的情况，又使在高空燃比下焓效率得到提高，使得最大焓效率相对于前 2 种方法有所提高，并且松木和玉米秸秆气化最佳空燃比反而比方法(二)优化后的最佳空燃比小。选择优化前和优化后生物质气化焓效率最大点所对应的焓效率及合成气低位热值进行比较，如图 7a 和 b 所示。优化前，松木、玉米秸秆和木屑的焓效率分别为 71.06%、69.87% 和 63.15%，合成气低位热值分别为 4.38、4.29 和 4.18 MJ/Nm³。提高气化剂温度后，最佳操作点焓效率和热值的提高都不明显；干燥生物质原料后，最佳操作点热值和焓效率有了明显的提高，焓效率分别为 74.59% 和 73.42%，热值分别为 5.68 和 5.54 MJ·Nm⁻³。木屑的焓效率和热值，与干燥生物质原料优化后的结果相差不大；优化后，松木气化的焓效率和合成气低位热值都最高，玉米秸秆次之，木屑最低。

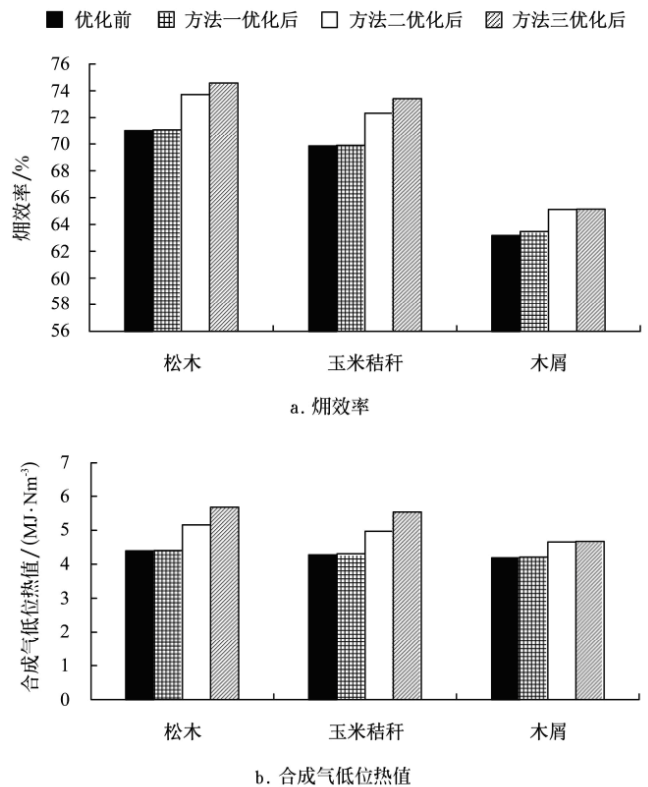


图 7 焓效率与合成气低位热值优化前后的比较
Fig.7 Comparison of exergy efficiency and syngas LHV before/after optimization

4 结 论

1) 生物质原料及其含水率对生物质气化特性有较大的影响。在相同的气化条件下, 热值较高的生物质气化过程的焓效率和合成气低位热值明显高于热值低的生物质气化过程的对应值; 随着含水率的降低, 生物质气化过程性能指标有所提高。对不同含水率的松木、玉米秸秆和木屑 3 种生物质气化过程进行焓分析, 在焓效率最大时得到的气化炉运行温度以及合成气热值为生物质能的高效利用提供了理论依据。

2) 提高气化剂温度和干燥生物质原料等方法可以提高气化过程的焓效率和合成气低位热值。在较低空燃比下, 提高气化剂温度可以有效提高气化过程的焓效率; 在相对高空燃比下, 干燥生物质原料可以明显提高气化过程的焓效率。

[参 考 文 献]

- [1] Peterson D, Haase S. Market Assessment of Biomass Gasification and Combustion Technology for Small- and Medium-Scale Applications[R]. NREL/TP-7A2-46190, 2009.
- [2] Ptasiński KJ, Hamelinck C, Kerckhof PJAM. Exergy analysis of methanol from the sewage sludge process[J]. Energy Conversion Management, 2002, 43: 1445—1457.
- [3] Rodrigues M, Walter A, Faaij A. Performance evaluation of atmospheric biomass integrated gasifier combined cycle systems under different strategies for the use of low calorific gases[J]. Energy Conversion Management, 2007, 48(4): 1289—1301.
- [4] Ptasiński K J, Prins M J, Pierik A. Exergetic evaluation of biomass gasification[J]. Energy, 2007, 32: 568—574.
- [5] 张巍巍, 陈雪莉, 王辅臣. 基于 ASPEN PLUS 模拟生物质气流床气化工艺过程[J]. 太阳能学报, 2007, 28(12): 1360—1364.
- Zhang Weiwei, Chen Xueli, Wang Fuchen. Process simulation of biomass entrained flow gasification based on Aspen Plus [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(12): 1360—1364. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈汉平, 赵向富, 米铁, 等. 基于 ASPEN PLUS 平台的生物质气化模拟[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 49—52.
- Chen Hanping, Zhao Xiangfu, Mi Tie, et al. Simulation of biomass gasification by ASPEN PLUS[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology. Nature Science, 2007, 35(9): 49—52. (in Chinese with English abstract)
- [7] Prins MJ, Ptasiński KJ. More efficient biomass gasification via torrefaction[J]. Energy, 2006, 31: 3458—3470.
- [8] Aspen Technology. Aspen Plus User Guide[M]. USA: Aspen Technology, 2006.
- [9] Aspen Technology. Getting Started Modeling Processes with Solids[M]. USA: Aspen Technology, 2006.
- [10] Szargut J, Morris D R, Steward F R. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes[M]. Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [11] Higman C. Gasification[M]. New York, 2003.
- [12] 雅克·范鲁, 耶普·克佩耶. 生物质燃烧与混合燃烧技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 16—32.
- [13] Waldheim L, Nilsson T. Heating value of gases from biomass gasification[R]. IEA Bioenergy Agreement, Task 20-Thermal Gasification of Biomass, 2001.
- [14] Vagonyte E, Andrew M. Development of co-firing power generation market opportunities to enhance the EU biomass sector through international cooperation with China[R]. Brussels: European Biomass Association, 2008.
- [15] 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.

Characteristics of biomass gasification and exergy analysis

Zhang Xiaotao¹, Huang Minghua¹, Wang Aijun¹, Zhang Yan¹, H. Arellano-Garcia², G. Wozny²

(1. Institute of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. Department of Process Science, Technical University of Berlin, Berlin 10623, Germany)

Abstract: In order to improve the biomass energy utilization efficiency and synthetic gas quality, based on AspenPlus simulation, the characteristics of biomass gasification were studied by exergy method while pine, cornstalk and sawdust were selected as gasification feedstock. When the air/biomass mass flow ratio changed from 0.7 to 2.3 as well as the feedstock contained 30% moisture content, the exergy efficiencies of gasification process and the low heating values of synthetic gas were calculated. The biomass gasification processes were optimized through the methods of increasing gasifying agent temperature and drying biomass feedstock. It shows that gasification performance can be greatly influenced by biomass species and its moisture content; The exergy efficiencies of gasification process and the low heat values of synthetic gas can be improved through reducing biomass moisture content and increasing gasifying agent temperature.

Key words: biomass, gasification, optimization, exergy efficiency