

文章编号:1673-0062(2015)02-0071-06

高热值生物质燃气气化炉的数值模拟

朱茂葵¹, 卿德藩^{1*}, 陈爱瑞¹, 米冰洁², 罗阳成¹

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:研究了以干木质颗粒作为燃料,以空气—水蒸气作为气化剂的户用高热值燃气生物质气化炉,利用 Fluent14.0 模拟了水蒸气入口距离气化炉内炉栅位置高度 h 、空气入口流量 V_0 与水蒸气入口流量 V_s 这三个参数对 CO 、 H_2 和 CH_4 的体积浓度和燃气热值影响,并采用实验验证数值模拟的结果. 研究的结果表明:若水蒸气入口位置高度 $h = 195 \text{ mm}$,水蒸气入口流量 $V_s = 1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,空气入口流量 $V_0 = 0.86 \text{ m}^3/\text{h}$,生物质燃气燃烧热值最大为 $Q = 9.95 \text{ MJ}/\text{m}^3$,相比单一空气气化剂作用下提高了 98.21%.

关键词:高热值;生物质;气化炉;数值模拟

中图分类号:TK229.8 **文献标识码:**B

Numerical Simulation Research on Higher Heating Value Gas Biomass Gasifier

ZHU Mao-kui¹, QING De-fan^{1*}, CHEN Ai-rui¹, MI Bing-jie², LUO Yang-cheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In this research, with woody particles as fuel and air-steam as gasification agent, the high heating value gas biomass gasifier uses numerical value of software Fluent 14.0 to simulate the impact of the three parameters, the position height ‘ h ’ from the entrance of steam to the gasifier grate, the air inlet flow V_0 and the steam inlet flow V_s , on CO , H_2 and CH_4 volume concentration and gas calorific value and use experiment to verify the result of numerical simulation. The results of research show that when the position height ‘ h ’ is 195 mm, the steam inlet flow V_s is $1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ and air inlet flow V_0 is $0.86 \text{ m}^3/\text{h}$, the combustion of biomass gas calorific value arrives its top, the value is $Q = 9.95 \text{ MJ}/\text{m}^3$, which is 98.21% higher than when single gas agent is used.

收稿日期:2014-10-24

基金项目:湖南省科技计划基金资助项目(2013GK3154)

作者简介:朱茂葵(1989-),男,广西钦州人,南华大学机械工程学院硕士研究生. 主要研究方向:可再生能源及高效节能技术. * 通讯作者.

key words: higher heating value; biomass; gasifier; numerical simulation

0 引言

随着社会经济的快速发展,人类社会的经济发展对化石能源的依赖程度日益加深,从而导致化石能源的消耗日益加剧^[1]. 上世纪 70 ~ 80 年代,全世界范围内发生了煤炭和石油等能源短缺危机,再次唤起了人们对生物质气化技术的研发^[2]. 因此,生物质气化技术作为一种清洁的可再生能源利用技术得到了快速发展^[3-4]. 目前国内开发生物质气化炉以供热、发电和合成液体为主,如美国 Range Fuels 和 Pearson 的气流床气化炉,德国 CHOREN 的气流床气化炉等;山东能源研究所的下吸式 XFL 气化炉、辽宁省能源所的下吸式固定床气化炉等^[5].

由于目前户用生物质气化炉大多以空气作为气化剂来制作生物质燃气,但是空气含有大量的 N_2 而使生物质燃气的燃烧热值降低. 因此,提高燃气热值成了目前研究的重点. 本文研究的户用高热

值燃气生物质气化炉采用空气—水蒸气作为气化剂对提高生物质燃气热值进行了数值模拟研究.

1 研究模型的建立

使用水蒸气—空气作为气化剂来提高燃气热值低的问题,是由于水蒸气—空气气化剂中 O_2 、水蒸气与生物燃料 C 成分进行氧化反应,生成了可燃气体成分为 H_2 、CO 和 CH_4 等,从而提高了燃气的燃烧热值. 因此,使用水蒸气—空气作为气化剂要优于单一空气气化剂.

气化炉主要由水蒸气供给系统、供风系统、换热系统、炉盖等组成,其结构形式如图 1 所示. 主要研究了水蒸气入口位置高度 h 、水蒸气入口流量 V_s 和空气入口流量 V_0 对燃气组分 CO、 H_2 和 CH_4 燃烧热值的影响. 气化炉进行气化反应计算截面图如图 2 所示,设定炉栅位置距离炉盖内侧总高度 H 为 750 mm,炉膛内横截面为边长 $L = 250$ mm 的正方形.

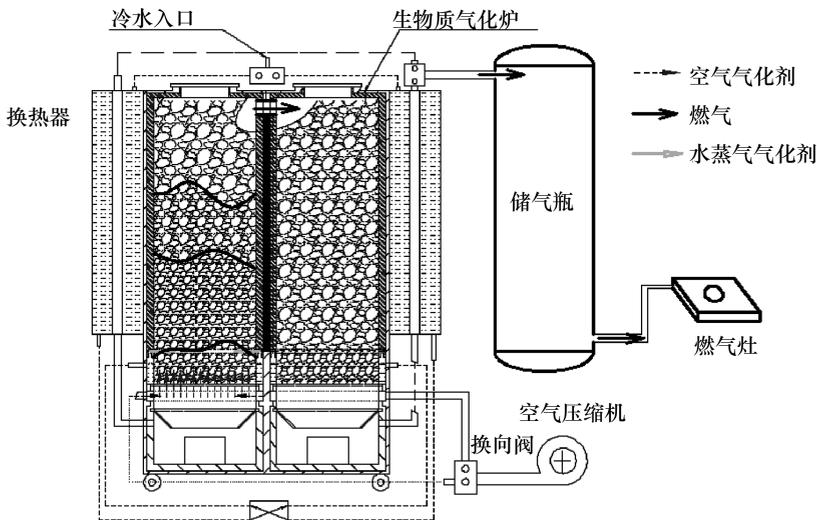


图 1 户用高热值生物质气化炉系统

Fig. 1 The high calorific value of the biomass gasification system

因为生物质气化炉内的燃烧气化反应存在很多的化学物理变化,为了便于对气化炉进行数值模拟研究,因此对气化反应过程进行的简化和假设如下^[6-8]:

1) 假设在燃料进行气化反应的气体均为理想气体;

2) 假设燃料中的 C 完全转化,而 H、N、O 则完全转化为气体;

3) 假设燃料颗粒的体形均相同,成分不参与气化反应;

4) 当气化炉处于稳定工况时,气化反应的参数均假设为常数.

基于以上假设,气化反应遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒以及组分转换和平衡等基本规律. 因此可用基本守恒方程来进行相应的数学描述和分析,选用变量 Φ 将方程组表示为以下通

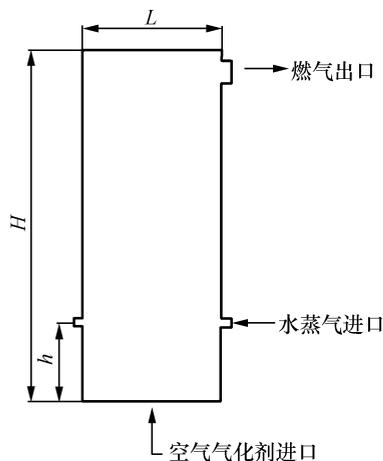


图 2 计算区域主视图

Fig. 2 Main view of the computational domain

用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中,通用变量 ϕ 表示湍流场中各变量瞬时值,如速度分量 u_i , 温度 T , 组分浓度 Y_m 等; Γ_{ϕ} 为输运系数, $\Gamma_{\phi} = \mu_{\epsilon}/\sigma_{\phi}$, 其中 σ_{ϕ} 为湍流 Prandtl 数或 Schmidt 数, 其值由实验确定, 可看成常数.

μ_{ϵ} 为湍流粘性系数, $\mu_{\epsilon} = \mu + \mu_T = (v + v_T)\rho$, 其中 v_T 或 μ_T 称为涡流粘性或涡流系数, S_{ϕ} 为各方程源项. 通用方程中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项^[7-10].

2 数值模拟

2.1 网格划分

为了对数值模拟进行等效简化并减少数值模拟的计算量, 将气化炉的三维模型等效简化为二维模型, 接着对该二维模型计算区域划分结构化网格, 划分好的结构网格如图 3 所示.

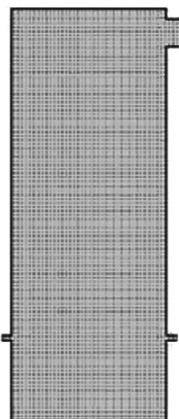


图 3 网格结构划分

Fig. 3 The structure grid division

2.2 边界条件的设置

对气化炉数值模拟设定初始条件和边界条件如下: 气化炉初始温度 350 K, 炉内装有 5 kg 生物质燃料; 气化反应温度的范围为 750 ~ 1 350 °C; 设置空气入口和水蒸气入口为速度入口条件, 空气入口流速均匀分布且常温, 其范围是 0.002 1 ~ 0.056 7 m/s, 水力直径为 0.3 m; 水蒸气温度为 375 K, 水蒸气入口速度范围 0 ~ 1.26 m/s, 流速均匀分布, 水力直径为 0.01 m; 燃气出口使用压力出口, 其水力直径为 0.05 m. 其中, 水力直径及湍流强度的计算公式^[11]如下:

$$D_H = 4 \cdot \frac{A}{S} \quad (2)$$

$$I = 0.16 (Re_{D_H})^{-\frac{1}{8}} \quad (3)$$

式中, D_H 为水力直径, A 和 S 分别为流体通道进出口各自的截面面积与周长; I 为湍流强度, Re 是根据水力直径为特征长度求得的雷诺数.

对模型的求解控制参数进行设定: 采用 FVM 对计算区域作基本守恒微分方程进行离散化处理, 使用 Simple 算法处理压力和速度的耦合问题, 为了提高数值模拟计算的精度和结果的稳定性, 能量方程和动量方程则采用二阶迎风格式; 使用加热入口质量流量作为提供点火源来启动燃烧, 并采用 EDC 输运模型来考虑湍流—化学反应相互作用.

2.3 数值模拟结果

2.3.1 水蒸气入口高度 h 对燃气燃烧热值的影响

在气化炉运作情况相同的条件下研究 h 对燃气组分的体积分数及燃烧热值的影响, 取水蒸气气化剂流量为 1.80 m³/h, 空气气化剂流量为 0.66 m³/h, 并在气化反应稳定时, 对 3 种不同水蒸气入口位置高度 h 进行了数值模拟研究, 得到 3 种不同水蒸气入口高度 $h_1 = 165$ mm, $h_2 = 195$ mm, $h_3 = 225$ mm 的数值模拟的温度分布云图分别如图 4 至图 6 所示.

从图 4 至图 6 所示的 3 种不同 h 的温度场分布可得: 在气化反应的时间和物质的量均相同的条件下, 气化炉内生物质燃气组分的体积浓度是由气化炉内气化反应的还原区的大小所决定的, 即还原区面积越大则燃气体积浓度越大, 反之越少. 从图 5 所示, 当水蒸气入口位置高度 $h_2 = 195$ mm 时, 炉内气化反应的区域在炉膛壁面处且红色高温燃烧区面积最大, 这样能更好地为水蒸气的产生提供所需的热量, 而且红色高温

燃烧区面积明显大于比 h_1 和 h_3 两种情况的面积. 即可说明当 $h_2 = 195 \text{ mm}$ 时气化反应所生成的燃气组分体积浓度最高, 由此计算得到的生物质燃气燃烧热值最高.

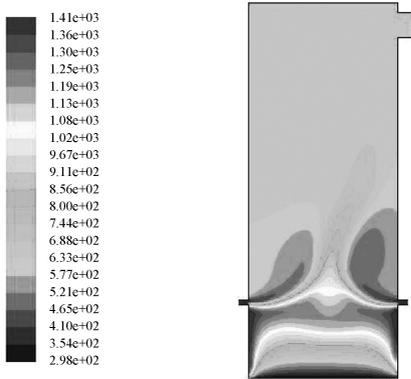


图4 h_1 温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution of h_1

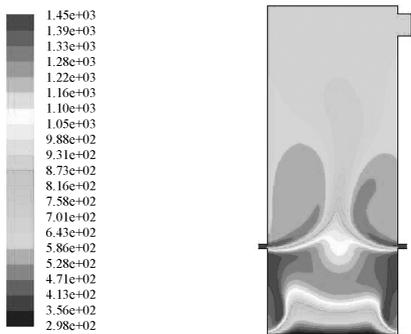


图5 h_2 温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution of h_2

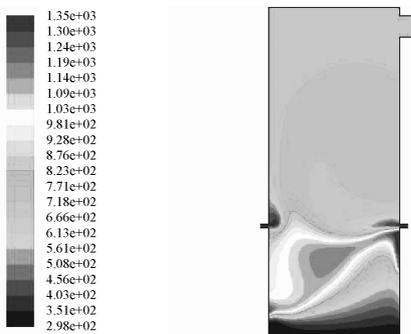


图6 h_3 温度分布云图

Fig. 6 Temperature distribution of h_3

2.3.2 两种气化剂流量对燃气燃烧热值的影响

对三种水蒸气气化剂入口位置的不同高度 (h_1 、 h_2 和 h_3) 进行数值模拟研究, 每一组水蒸气入口流量 V_s 与空气入口流量 V_0 均是一对固定

值. 为了比较不同的水蒸气入口位置高度的水蒸气入口流量 V_s 与空气入口流量 V_0 对燃气体积浓度以及燃烧热值的影响, 根据增加水蒸气流量, 则减少空气流量的原则, 建立并对 V_s 与 V_0 的 12 组定值进行数值模拟, 12 组定值表如表 1.

表1 两种气化流量定值列表(单位: m^3/h)

Table 1 Two kinds of gasification velocity value list (Unit: m^3/h)

No.	V_0	V_s	No.	V_0	V_s	No.	V_0	V_s
1	1.85	0	5	1.18	0.84	9	0.52	2.11
2	1.68	0.15	6	1.03	1.13	10	0.36	2.39
3	1.51	0.27	7	0.86	1.41	10	0.19	2.53
4	1.35	0.55	8	0.67	1.83	12	0.05	2.81

气化炉气化反应的空气入口流量在单位时间内的最大值为 $1.85 \text{ m}^3/\text{h}$, 水蒸气入口流量的最大值为 $2.81 \text{ m}^3/\text{h}$, 且所需的空气流量最小值为 $0.05 \text{ m}^3/\text{h}$; 得到数值模拟的结果如图 7 至图 9.

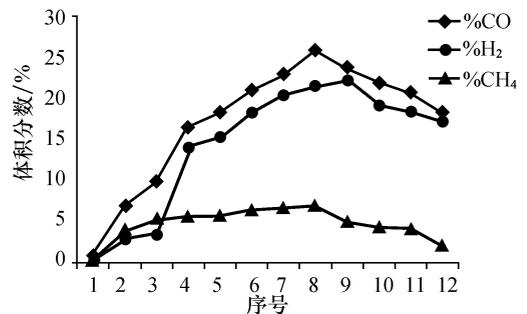


图7 h_1 时燃气成分的体积分数在两种气化剂 12 组流量的分布

Fig. 7 Volume fraction of gas component with two kinds of gasifying agent 12 group of flow distributions under h_1

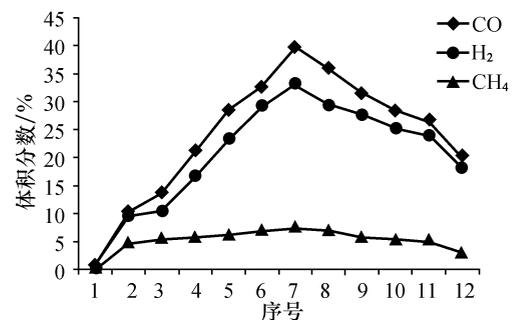


图8 h_2 时燃气成分的体积分数在两种气化剂 12 组流量的分布

Fig. 8 Volume fraction of gas component with two kinds of gasifying agent 12 group of flow distributions under h_2

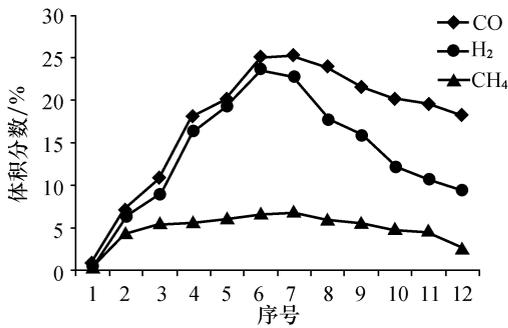


图9 h_3 时燃气成分的体积分数在两种气化剂12组流量的分布

Fig.9 Volume fraction of gas component with two kinds of gasifying agent 12 group of flow distributions under h_3

根据燃气热值计算公式:

$$Q_{DW} = \sum r_i Q_{DW,i} \quad (4)$$

式中, Q_{DW} - 生物质可燃气体的低位热值, 如 H_2 为 10 798 kJ/m³, CO 为 12 636 kJ/m³, CH_4 为 35 818 kJ/m³; r_i - 生物质可燃气体的体积成分, 由此可以得气化反应生成的生物质可燃气体的热值. 并计算两种气化剂在 12 组流速下的不同水蒸气入口位置高度的燃气热值, 如图 10 所示.

由图 7 至图 10 的模拟曲线图可以得到: 当水蒸气气化剂入口位置高度 $h_2 = 195$ mm, 水蒸

气流量 $V_s = 1.41$ m³/h 和空气流量 $V_0 = 0.86$ m³/h 时, 气化反应生成的燃气组分中 CO、 H_2 和 CH_4 的体积浓度最大且燃烧热值最大.

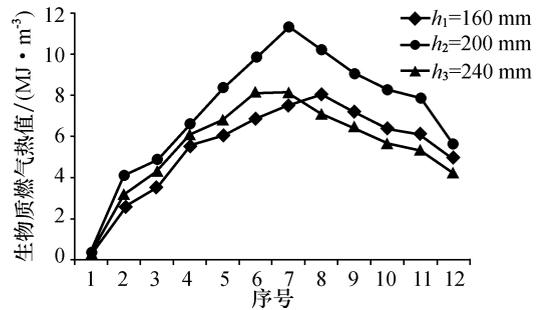
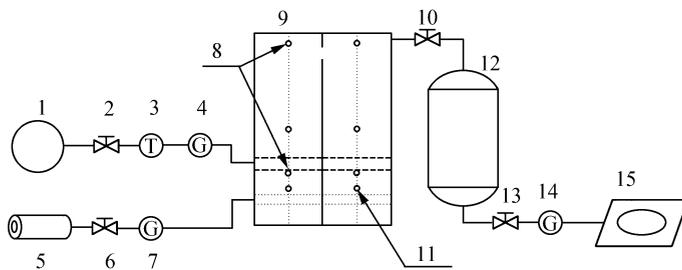


图10 不同 h 的燃气热值随两种气化剂流量变化的分布

Fig.10 The combustible gas calorific value with two gasification agents flow distribution in different h

3 实验验证

前文采用软件进行了数值模拟并得到了数值模拟结果, 为验证其数值模拟结果, 则使用实验研究方法对前面的参数进行实验验证. 进行实验装置简图如图 11 所示.



1. 电蒸汽锅炉; 2, 6, 10, 13. 控制阀; 3. 温度计; 4, 7, 14. 流量计; 5. 空气压缩机
8. 热电偶; 9. 测试气化炉; 11. 点火器; 12. 储气瓶; 15. 燃气灶

图11 实验装置简图

Fig.11 Schematic flow diagram of experimental system

根据水蒸气入口位置高度 h 、空气气化剂流量 V_0 与水蒸气流量 V_s 三个参数的正交试验设计得到的正交表, 使用正交实验所设计的正交表组合该三个参数得到如表 2 的 9 种工况, 并对这 9 种工况的燃气热值模拟结果与相应的实验测试结果进行比较, 其比较结果如表 3.

从表 3 可得, 九种工况下实验测试的燃气热值结果均小于数值模拟结果, 实验值与模拟值相对误差都在 15% 以下, 属于相对误差允许范围,

则可说明实验测试结果与数值模拟结果基本符合, 从而验证了数值模拟结果的正确性, 同时也说明了数值模拟方法的可行性. 由表 2 和表 3 得到的试验序号 4 为最优参数组: $h = 195$ mm、 $V_0 = 0.86$ m³/h、 $V_s = 1.41$ m³/h.

为了研究在最优参数组下气化反应生成的生物质燃气热值提高程度, 选取该最优参数组合与只有单一空气气化剂且 $V_0 = 1.18$ m³/h 时生物质燃气的燃烧热值进行比较, 其比较结果如表 4.

表2 三种参数的九种工况的组合

Table 2 The combination of nine conditions of three parameters

试验号	影响因素		
	h/mm	$V_0/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$V_s/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
1	165	0.79	1.48
2	165	0.87	1.40
3	165	0.95	1.32
4	195	0.87	1.40
5	195	0.79	1.32
6	195	0.95	1.48
7	225	0.79	1.32
8	225	0.87	1.48
9	225	0.95	1.40

表3 模拟结果与实验结果比较

Table 3 The simulation results compared with the experimental test results

实验 序号	燃气热值 $Q/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$		
	模拟值	实验测试值	相对误差/%
1	10.45	9.62	8.63
2	10.96	9.54	14.88
3	10.68	9.52	12.18
4	11.25	9.95	13.07
5	10.85	9.55	13.61
6	10.58	9.44	12.08
7	9.49	8.76	8.33
8	9.80	9.15	7.11
9	9.63	9.54	0.94

表4 生物质燃气热值比较结果

Table 4 The comparison results of biomass fuel gas heating value

比较项	实验测试值
最优参数组合 $Q/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	9.95
单一空气气化剂 $Q/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	5.02
$\Delta Q/\%$	98.21

由表4可得:最优参数组合的燃气热值比单一空气气化剂作用下提高了98.21%。因此,数值模拟结果达到了提高生物质燃气燃烧热值的要求,而实验测试结果达到了验证数值模拟结果正确性的要求。由此可得,生物质燃气热值有:

$$Q_{\text{优化参数}} > Q_{\text{单一空气气化剂}}$$

4 结论

1)由数值模拟结果与实验测试结果分析,当水蒸气气化剂入口位置高度 $h_2 = 195 \text{ mm}$,水蒸气流量 $V_s = 1.41 \text{ m}^3/\text{h}$ 和空气流量 $V_0 = 0.86 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气化炉气化反应生成的生物质燃气组分 CO 、 H_2 和 CH_4 的体积浓度最大且燃气燃烧热值最高。

2)气化炉较优参数组合的燃气燃烧热值比单一空气气化剂作用下提高了98.21%。此外,生物质燃气热值有:

参考文献:

- [1] 倪维斗. 我国的能源问题与对策[J]. 宁波大学学报(人文科学版), 2009, 22(1): 5-8.
- [2] 赵全云. 利用生物质燃料的气化加热设备设计与分析研究[D]. 太原市: 太原理工大学, 2011.
- [3] 张齐生, 马中青, 周建斌. 生物质气化技术的再认识[J]. 南京林业大学学报, 2013, 37(1): 1-10.
- [4] 张丽萍. 生物质能利用技术的发展概况[J]. 山东化工, 2013, 42(4): 54-62.
- [5] 邓先伦, 高一苇, 许玉, 等. 生物质气化与设备的研究进展[J]. 生物质化学工程, 2007, 41(6): 37-41.
- [6] 蒋建春, 应浩, 戴伟娣, 等. 锥形流化床生物质气化技术和工程[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 211-216.
- [7] 刘作龙, 孙培勤, 孙绍晖, 等. 生物质气化技术和气化炉研究进展[J]. 河南化工, 2011, 28(1): 21-25.
- [8] 刘作龙. 在不同气化剂条件下生物质气化模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [9] Hyvarianen A, Oja E. Independent component analysis: algorithms and application[J]. Neural Networks, 2000, 13(4/5): 411-430.
- [10] Cardoso J F. Sources separation using higher order moments[C]//Glasgow. International Conference on Acoustic Speech and Signal Processing(ICASSP' 1989). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1989: 2109-2112.
- [11] 沈丽. 户用生物质气化炉燃烧模拟及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [12] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 114-158.
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 47-48.