

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.018

主动配气式生物质气化炉流场模拟与试验*

郭飞强¹ 董玉平¹ 景元琢² 董磊² 王慧¹ 杜红光¹

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 山东百川同创能源有限公司, 济南 250101)

【摘要】 对下吸式固定床气化炉采用两层配气口实现气化剂进给量的主动控制,利用 Fluent 软件对炉内气压分布和速度进行模拟分析,结果表明气化炉主要反应区气压场呈现“梯级分布、层界分明”规律,速度场由上而下逐渐递增,同一截面流场具有较高的均匀性。以玉米秸秆为原料,对本气化炉压力场和温度场进行了试验研究,结果表明采取主动配气有利于促进气化炉的均匀反应,同一反应截面反应温度相对稳定,燃气组分波动较小,热值保持在 5 500 kJ/m³ 以上。

关键词: 生物质 热解气化 主动配气 流场

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0093-04

Flow Fields Simulation of Biomass Gasifier under Active Air Distribution

Guo Feiqiang¹ Dong Yuping¹ Jing Yuanzhuo² Dong Lei² Wang Hui¹ Du Hongguang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

(2. Shandong Baichuan Tongchuang Energy Company, Ltd., Ji'nan 250101, China)

Abstract

Two layers of air distribution were designed to actively control the agent feed in down-draft fixed bed biomass gasifier. The pressure and velocity distribution inside the gasifier were studied by simulation analysis. The pressure field displayed the law of step distribution and obvious boundaries. The velocity pattern was higher from top to down with high level of uniformity in the same section. Experiments were done to test the pressure and temperature distribution in the gasifier by using corn stalk as materials. The results showed that it had an important effect of active air distribution on promoting the reaction uniformity. The temperature kept stability at the same section with little changes of the gas components, and calorific value kept above 5 500 kJ/m³. This method can provide a new way to improve the working performance of the fixed gasifier.

Key words Biomass, Gasification, Active air distribution, Pressure field

引言

生物质热解气化是实现生物质能量转化的最佳途径之一,可以将储量丰富的生物质资源转化为清洁燃气,替代化石能资源,受到了普遍关注^[1-2]。

国内外对生物质热解气化开展了研究,主要集中在流化床气化^[3-5]。然而主动配气下固定床气化炉的流场模拟与研究在国内外未见文献报道。

目前,常规下吸式生物质气化炉多采用气化剂被动进给的方式,在引风机的作用下,气化剂进给量主要与炉膛内的气压相关,缺乏有效的调节方式,容易造成局部燃烧不均,燃气质量具有较大的波动性^[6-8]。本文建立双层主动配气气化模型,主动控制气化剂的供给,利用 CFD 软件 Fluent 模拟,研究主动配气时气化炉内流场分布特性,并通过试验的方式验证主动配气技术在促进气化反应稳定运行、

收稿日期: 2011-05-02 修回日期: 2011-09-05

* 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009EZ001)和山东大学研究生自主创新基金资助项目(31360071613057)

作者简介: 郭飞强,博士生,主要从事生物质热解气化和燃气净化技术研究,E-mail: shandaguofeiqiang@163.com

通讯作者: 董玉平,教授,博士生导师,主要从事生物质能高效清洁转换技术研究,E-mail: dongyp@sdu.edu.cn

提高燃气质量等方面所起到的作用。

1 气化炉内部流场模拟

1.1 气化炉结构模型

主动配气式生物质气化炉结构模型如图1所示,采用上、下两层进气口对气化炉进行主动配气,每层进气口的数量为9个,间隔为 40° ,配气口的直径为50 mm,在下层配气口和炉排之间均匀开设4层检测口,每层3个,间隔为 120° 。

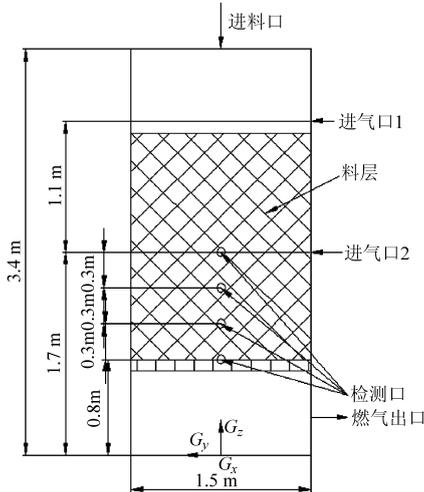


图1 气化炉结构模型

Fig.1 Structural model of gasifier

1.2 气化炉建模和边界条件设置

本文采用Fluent附带建模软件Gambit对气化炉进行三维建模和网格化处理,采用四面体网格划分方法。边界条件设置为:①进口条件为速度进口。②出口条件为压力出口。③料层采用各向同性的多孔介质模型,通过在流体动量方程中附加的动量源项来考虑流体通过多孔介质时,流体流动所受的影响。湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型^[9-11]。

1.3 模拟结果

(1) 气化炉内气压分布

图2为主要反应区气体压力分布示意图,从图中可以看出,从炉顶到燃气出口压力呈现层界分明并具有逐渐下降的趋势,在同一截面的床层压力具有较好的均匀性。

$z=0.8$ m处为炉排位置,炉排以上,气化炉内压力为正压。从气化炉上层进气口至下层进气口之间,气体压力总体分布较为平稳,在接近下层进气口处,由于气化剂高速进给,造成一定的气压波动。

从气化炉下层进气口至炉排,气化炉内气压下降梯度较小,气化剂供给均匀,而此部分区域为气化反应的主要区域,因而有利于原料氧化反应和还原反应的均匀进行。

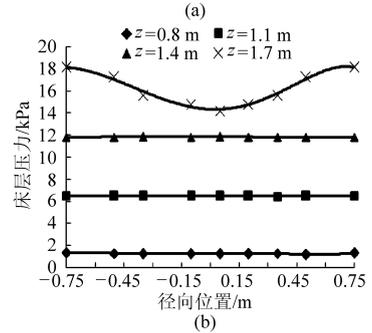
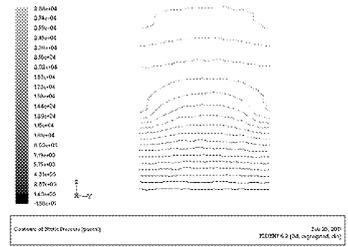


图2 气化炉床层气压分布

Fig.2 Pressure distribution in the gasifier

(a) 气化炉内轴向截面气体压力分布轮廓图

(b) 主要反应区径向气体压力分布

(2) z 轴方向气体速度矢量分布

气化剂的均匀流动是气化反应高效平稳运行、避免“抽空”现象发生的重要因素,图3为气化炉内气体速度分布图。

由图可以看出,从上层进气口至炉排,气化剂的流动速度逐渐增大,在下层进气口和炉排之间,气化剂保持较高的流动速度,满足气化炉氧化反应区对气化剂的需求,提高了气化效率和燃气质量。

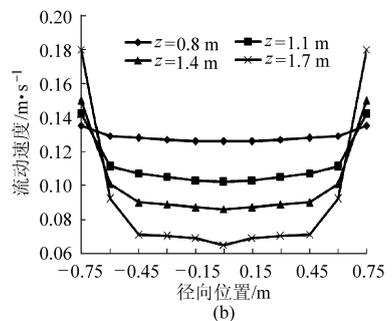
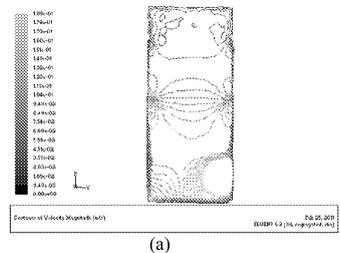


图3 中心垂直截面床层速度分布

Fig.3 Velocity distribution of the air in gasifier

(a) 气化炉轴向截面气体速度分布轮廓图

(b) 主要反应区径向截面气体速度分布

图3b中,气化剂流动速度沿气化炉轴线呈对称状态, $z=1.7$ m处为下层配气口,气化剂沿径向方向高速进入,进入多孔介质层,气化剂水平速度逐渐衰

减,至 $z=1.4\text{ m}$ 处,气化剂轴向速度在同一截面已基本达到均匀状态,即气化炉主要反应区的气化剂流动速度能够保持较高的一致性,有利于同一截面气化反应的均匀进行,可以有效地避免气化炉内部因气化剂不均而导致的同一截面反应不同步性。

表1 玉米秸秆化学成分

Tab.1 Chemical composition of corn stalk

材料	工业分析/%				元素分析/%				空干热值 /kJ·kg ⁻¹	堆积密度 /kg·m ⁻³
	水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	N	S		
玉米秸秆	5.12	5.76	71.64	17.48	45.54	6.02	0.77	0.13	17746	67

2.2 试验装置与仪器

试验气化炉采用山东大学生物质能技术开发中心研发的主动配气下吸式固定床气化炉,如图4所示。炉顶采用密封连续进料系统,下层为滚动式炉排结构,可以不必停炉实现灰分的连续排出。炉膛四周开设上、下两层配气口,利用风机实现对炉膛的主动配气,每层开设9个配气口,避免出现对吹现象。此外还包括固定床在线压力及温度测试系统、气体流量计、奥氏气体分析仪、取样袋等。

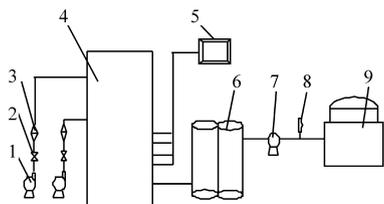


图4 气化试验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the gasification experimental apparatus

1. 配风机 2. 控制阀 3. 流量计 4. 气化炉 5. 温度及压力在线测试系统 6. 湿式净化机组 7. 引风机 8. 取样袋 9. 气柜

2.3 试验步骤

添加原料后,首先在气化炉冷态工作下,启动配气风机和引风风机,通过配气口对气化炉主动配气,在线测试4层检测口流速和压力,分析气化炉内气压分布规律。

其次,正常启动运行气化炉,对气化炉内主要反应区的温度、压力进行实时监测,并根据温度变化调节气化剂的供给量,对净化后的燃气进行取样,分析燃气成分,计算燃气热值。

2.4 试验结果与分析

2.4.1 气化炉压力场试验

试验过程中对气化床冷态床层压力(EC)、热态床层运行压力(EH)进行在线检测,并与床层压力模拟值(M)进行对比。气化炉内4个检测层气压分布如图5所示,气化炉主要反应层的压力随运行时间浮动变化不大,4个截面的气压值略高于0 kPa,与

2 试验

2.1 试验材料

试验所用原料为玉米秸秆,其工业分析和元素分析见表1^[12]。

模拟结果具有较好的一致性,表明采用本供气系统,气化炉主要反应区的压力整体具有良好的稳定性,同一截面不会出现明显的压力差。

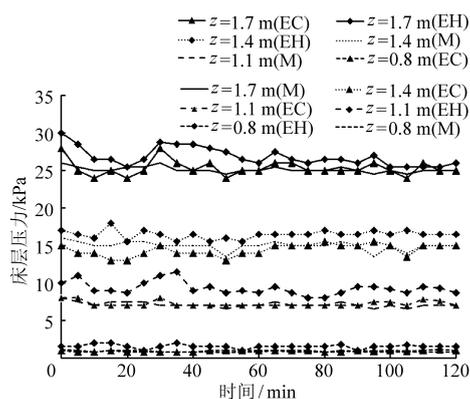


图5 气化炉床层气压分布

Fig.5 Pressure distribution in gasifier

在典型时刻,炉内压力相对于模拟结果具有一定的偏差,其主要原因是由于生物质原料的复杂性,导致其同一截面的阻力不尽相同。床层气压总体显示随炉层下降而逐渐降低的趋势,同一截面不同位置的气压值基本不变,因而在气化炉下层配气口至炉排的整个空间内,气化炉内的气化剂分布较为均匀,不会出现局部气压明显不均的现象。气化炉内整体气压分布有利于气体的均匀流动,使反应过程中同一截面不同位置点的反应具有良好的同步性。

2.4.2 气化炉温度场分布规律

在该配气方式下,当气化炉运行稳定后,在120 min内,4个反应层主要温度变化规律如图6所示。受下层配气的影响, $z=1.7\text{ m}$ 和 $z=1.4\text{ m}$ 反应层温度在反应过程中具有一定的波动性,其反应温度分别为 560°C 和 760°C 左右,是炉内发生热解反应的主要区域。随着炉层的向下推移,气化炉反应层的压力场分布逐渐均匀,在 $z=1.1\text{ m}$ 和 $z=0.8\text{ m}$ 反应层温度基本保持不变,其中 $z=1.1\text{ m}$ 反应层的温度为 1000°C 左右,是生物质氧化反应的主要区域,

$z=0.8\text{ m}$ 反应层的温度为 870°C 左右,是生物质还原反应的主要区域。

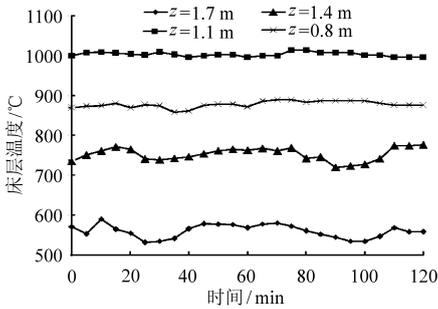


图6 气化炉床层温度分布

Fig. 6 Temperature distribution in gasifier

由此可知在主动配气条件下,气化炉内压力场在同一截面相对稳定,使气化炉同一截面反应处于相对均匀的环境,其中在气化炉主要的氧化和还原反应区域,同层温度变化较小,证实主动配气能够确保气化炉氧化和还原反应均匀稳定运行。

2.4.3 燃气组分变化规律

待气化炉运行稳定后,利用取样袋每隔 20 min 对燃气取样一次,共取样 10 次,分析燃气主要成分和燃气热值变化。

燃气主要成分和热值变化如图 7 所示,气化炉运行过程中,燃气中的主要组分含量基本保持不变,其中 CO 体积分数为 20% 左右, H_2 体积分数为 13% 左右,二者含量始终保持在 30% 以上,燃气热值在 $5\,500\text{ kJ/m}^3$ 以上,最高达到 $5\,700\text{ kJ/m}^3$,且过程中燃

气品质较为稳定,没有观测到抽空、结焦等现象^[13-15]。

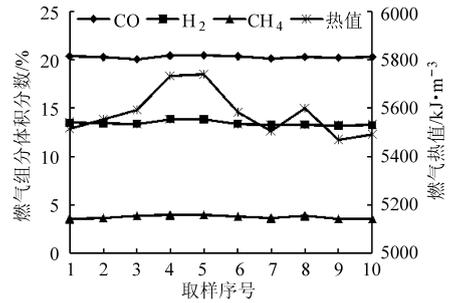


图7 气化炉燃气组分体积分数和热值变化

Fig. 7 Gas composition and heat value of the gasifier

3 结论

(1) 主动配气下生物质气化炉内气压场具有明显的“梯级分布、层界分明”特性,与普通下吸式固定床气化炉相比,同一反应层气化剂分布均匀,主要反应区气化剂流速增大,供给均匀充足,有利于气化反应的高效稳定运行。

(2) 气化炉试验反应过程中,反应温度是反应状态的直接反馈,采用主动配气可以使气化炉主要反应区域温度处于稳定状态,尤其是氧化和还原反应同层反应温度较为均匀,验证了生物质在同一截面具有稳定的反应,可有效避免“抽空”等现象。整个运行过程燃气热值高于 $5\,500\text{ kJ/m}^3$,且过程气质稳定,相较于传统下吸式气化炉 $4\,800\sim 5\,000\text{ kJ/m}^3$ 的燃气热值具有明显的提升。

参 考 文 献

- 董玉平,邓波,景元琢,等. 中国生物质气化技术的研究和发展现状[J]. 山东大学学报:工学版,2007,37(2):1~7.
Dong Yuping, Deng Bo, Jing Yuanzhuo, et al. A review of the research and development of biomass gasification technology in China [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2007, 37(2): 1~7. (in Chinese)
- 刘荣厚,牛卫生,张大雷,等. 生物质热化学转换技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:123~147.
- Manuel Campoy, Alberto Gómez-Barea, Fernando B Vidal, et al. Air-steam gasification of biomass in a fluidized bed: process optimization by enriched air [J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(5): 677~685.
- 吕鹏梅,常杰,吴创之,等. 生物质快速催化裂解的反应动力学[J]. 太阳能学报,2005,26(5):647~653.
Lü Pengmei, Chang Jie, Wu Chuangzhi, et al. An investigation on the kinetics of biomass fast catalytic pyrolysis [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2005, 26(5): 647~653. (in Chinese)
- 孙绍增,凌锋,张晓辉,等. 稻壳旋风空气气化器的数值模拟[J]. 太阳能学报,2008,29(12):1573~1577.
Sun Shaozeng, Ling Feng, Zhang Xiaohui, et al. Numerical simulation of cyclone husk air gasification [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(12): 1573~1577. (in Chinese)
- 孙洋,杨天华,刘耀鑫,等. 气化介质对生物质多孔床料流化床气化产气特性的影响[J]. 燃料化学学报,2009,37(2):119~123.
Sun Yang, Yang Tianhua, Liu Yaoxin, et al. Effect of gasifying agent on gas composition of biomass fluidized bed gasification with porous bed material [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(2): 119~123. (in Chinese)
- 李大中,张瑞祥,韩璞,等. 基于热化学平衡机理的生物质气化过程模型[J]. 节能技术,2008,26(5):418~422.
Li Dazhong, Zhang Ruixiang, Han Pu, et al. Modeling of gasification process of biomass based on thermo-chemical equilibrium mechanism [J]. Energy Conservation Technology, 2008, 26(5): 418~422. (in Chinese)

- Ma Haijun, Song Changbing, Zhang Jishu, et al. Influence of frequency of electric excitation signal on dielectric property of fuji apples with red-dot disease [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 97 ~ 101. (in Chinese)
- 8 张道德. 金冠苹果果实的介电特性与无损检测技术的研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2007.
Zhang Daode. Study on the dielectric property and the non-destructive testing technology of malus pumila mill [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 9 郭文川, Stuart O Nelson, Samir Trabelsi, 等. 蜜瓜和西瓜果汁的射频介电特性及其与糖度的关系[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 289 ~ 292.
Guo Wenchuan, Stuart O Nelson, Samir Trabelsi, et al. Radio frequency (RF) dielectric properties of honeydew melon and watermelon juice and correlations with sugar content [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(5): 289 ~ 292. (in Chinese)
- 10 王玲, 黄森, 张继澍, 等. ‘嘎拉’苹果果实品质的电学特性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 402 ~ 407.
Wang Ling, Huang Sen, Zhang Jishu, et al. Electric properties of ‘Gala’ apple fruit quality [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(2): 402 ~ 407. (in Chinese)
- 11 王瑞庆, 张继澍, 马书尚. 基于电学参数的货架期红巴梨无损检测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 243 ~ 247.
Wang Ruiqing, Zhang Jishu, Ma Shushang. Nondestructive determination of the quality of Red Bartlett pear during shelf life by electrical characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 243 ~ 247. (in Chinese)
- 12 邵晓蕾, 黄森, 于春阳, 等. 尖柿果实采后电学特性和品质指标的关系[J]. 西北农业学报, 2010, 19(9): 80 ~ 98.
Shao Xiaolei, Huang Sen, Yu Chunyang, et al. Relationship between electrical parameters and quality Indexes of postharvest persimmon fruit [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(9): 80 ~ 98. (in Chinese)

(上接第 96 页)

- 8 骆伟峰, 王红林, 陈砺, 等. 下吸式固定床气化木薯茎秆试验研究[J]. 广东化工, 2008, 35(6): 13 ~ 16.
Luo Weifeng, Wang Honglin, Chen Li, et al. Experiment research on gasification of cassava stalk in downdraft gasifier [J]. Guangdong Chemical Industry, 2008, 35(6): 13 ~ 16. (in Chinese)
- 9 杨勃, 李维仲. 热质渗透壁面饱和多孔介质通道流动与热质传递的数值模拟[J]. 热科学与技术, 2004, 3(4): 309 ~ 313.
Yang Bo, Li Weizhong. Forced convection heat and mass transfer in saturated porous channel with heat and mass permeable wall [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, 3(4): 309 ~ 313. (in Chinese)
- 10 毕文涛, 郭英锋, 沙莎, 等. 乙烯裂解炉管内裂解反应的 CFD 模拟[J]. 天津科技大学学报, 2008, 23(1): 49 ~ 52.
Bi Wentao, Guo Yingfeng, Sha Sha, et al. CFD Simulation on the cracking reactions in tubular reactor of ethylene cracking furnace [J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2008, 23(1): 49 ~ 52. (in Chinese)
- 11 Gao Jinsen, Chang Jian, Xu Chunming, et al. CFD simulation of gas solid flowing FCC strippers [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(7): 1 827 ~ 1 841.
- 12 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 92 ~ 95.
- 13 袁振宏, 吴创之, 马隆龙, 等. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 169 ~ 179.
- 14 王武林. 生物质气化技术及焦油净化方法[J]. 农机化研究, 2010, 32(4): 182 ~ 184.
Wang Wulin. Biomass gasification technology and tar purification methods [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(4): 182 ~ 184. (in Chinese)
- 15 郭飞强, 董玉平, 董磊, 等. 主动配气下生物质气化焦油热裂解特性试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 135 ~ 138.
Guo Feiqiang, Dong Yuping, Dong Lei, et al. Tar thermal cracking in biomass gasifier under active air distribution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 135 ~ 138. (in Chinese)