

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.018

# 基于 Fluent 的固定床生物质气化炉冷态压力场研究\*

孙宏宇<sup>1</sup> 董玉平<sup>1</sup> 周淑霞<sup>1</sup> 董磊<sup>2</sup> 景元琢<sup>2</sup>

(1. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061;

2. 济南百川同创实业有限公司, 济南 250101)

**【摘要】** 以下吸式固定床生物质气化炉物理模型为研究对象,应用流体仿真软件 Fluent,对冷态气化炉在单、双层气化剂配风工况下的床层压力场进行仿真研究。通过气化炉多点测压实验,对仿真结果进行验证。利用欧拉-拉格朗日方法分析气化炉冷态流场分布特性,根据伯努利方程说明气化炉床层压力场的变化原因。结果表明,仿真与实验结果的误差值在 2.5% 以内,气化剂配风工况的变化改变了炉内流场,双层气化剂配风使氧化层压力场平均值为 14.98 kPa,高于单层配风工况,且轴向压力分布均匀。

**关键词:** 生物质气化 下吸式气化炉 数值模拟 气化压力

**中图分类号:** TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0094-04

## Analysis of Fixed-bed Biomass Gasifier Cold Internal Pressure Field Based on Fluent

Sun Hongyu<sup>1</sup> Dong Yuping<sup>1</sup> Zhou Shuxia<sup>1</sup> Dong Lei<sup>2</sup> Jing Yuanzhuo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China 2. Ji'nan Baichuan Tongchuang Company Ltd., Ji'nan 250101, China)

### Abstract

Taking the physical model of downdraft biomass gasifier as the research object, fluid simulation software Fluent was used, the pressure field of the gasifier that in the condition of single-layer air-distribution and double-layer air-distribution was comparatively analyzed. By means of multi-point pressure measurement experiment, the simulation results were verified. The Euler - Lagrange model was used to analyze the cold characteristics flow field distribution of gasification. The reason of diversification in pressure field by Bernoulli's equation was discussed. The results showed that the deviation value of simulation and experimental results was under 2.5%. Different air-distribution condition should lead to the changes of flow field in biomass gasifier. Double-layer air-distribution condition made the average pressure in oxidation area of 14.98 kPa, higher than that in the condition of single air-distribution. And also the axial direction pressure distributed equally.

**Key words** Biomass gasification, Downdraft gasifier, Numerical simulation, Gasification pressure

### 引言

生物质气化<sup>[1]</sup>是生物质热化学转换的关键技术之一,在气化炉大型化以后,伴随而来的是生物质

气化炉实验成本的提高,和反复实验的可行性降低,同时,在高温工况下,人员安全问题无法得到有效的保证,因此,对大型气化炉模拟研究工作十分必要。

国内外学者做了大量有关气化炉数值模拟方面

收稿日期: 2009-12-24 修回日期: 2010-01-05

\* 山东省自然科学基金资助项目(2009ZRA01100)

作者简介: 孙宏宇, 博士生, 主要从事生物质能开发及利用研究, E-mail: bbe-119@163.com

通讯作者: 董玉平, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质能开发及利用研究, E-mail: dongyp@sdu.edu.cn

的研究,国内的研究主要集中于煤气化工程的实验和模拟分析<sup>[2-4]</sup>,对煤气化炉温度、气化压力影响机理、气化剂滞留时间对煤气化过程和燃气组分的影响以及气化压力对痕量元素的迁移规律进行了分析。在生物质气化方面,车丽娜等对上吸式气化炉进行了建模和模拟,得出炉层高度对燃气成分和炉内混合温度的影响规律<sup>[5]</sup>。Sadaka 等对双相流化床气化炉进行了数值模拟<sup>[6]</sup>。高杨等使用 Aspen Plus 平台模拟流化床生物质气化制氢过程<sup>[7]</sup>。国外研究下吸式生物质气化炉的文献较多,Paulo<sup>[8]</sup>等对以木材为床料的下吸式生物质气化炉的一部分工作参数进行了模拟分析,得到了生物质气化参数的变化对气化强度的影响。

从工业分析和元素分析来看,生物质与煤有相当大的区别,在研究中不能完全按照煤气化方法进行,气化炉炉型的不同在气化过程中原料燃烧热解方式和配风工艺也不相同,而且国外大多仅对以木材为床料的下吸式生物质气化炉各项工作参数进行了模拟分析,没有涉及到低品质秸秆床料气化炉。

本研究针对上述问题,对产气量为 780 Nm<sup>3</sup>/h 以稻壳为原料的下吸式固定床秸秆气化炉内部压力场和气流场在不同配风工况条件下进行数值模拟分析,再经过多点测压实验验证模拟结果的可靠性,为生物质气化炉模拟分析提供依据。

## 1 数值模拟

### 1.1 数学模型

气化炉结构简图如图 1 所示。

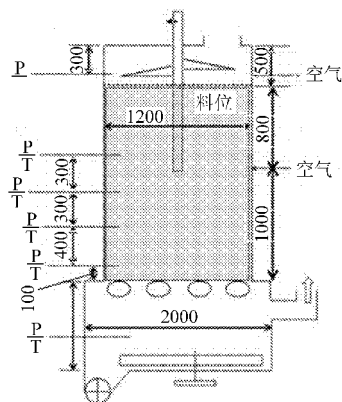


图 1 生物质气化炉简图

Fig. 1 Diagram of the biomass gasifier

本文采用基于有限体积法的 CFD (computational fluid dynamics) 商用软件 Fluent 进行计算,气化炉内的气体流动由质量、动量守恒方程描述。连续性方程的一般形式为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

动量方程在惯性坐标系中  $i$  方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \gamma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中  $p$ ——静压  $\gamma_{ij}$ ——应力张量

$g_i, F_i$ —— $i$  方向上的重力体积力和外部体积力,  $F_i$  包含了模型的相关源项

由于生物质原料孔隙不均匀,且上部有搅拌器转动,气化剂进入炉内后运动极不规则,极不稳定,每一点的速度随机变化着,因此其流态应选用湍流模型,本文选用标准 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟气相湍流运输<sup>[9]</sup>。

### 1.2 网格划分

因气化炉整体结构较复杂,为方便而准确地进行数值模拟,对气化炉作了简化处理,建模时省去了工艺上的圆角。炉体高度为 2.3 m,直径为 1.2 m;填料层高度 1.8 m,上、下层配风管各为 8 个,均匀水平圆周分布,分别位于距底部 2.0 m 和 1.0 m 处,直径为 0.05 m;在 Gambit 建立三维实体模型,对炉体和配风管分别用非结构四面体网格和六面体网格划分,共有 707 595 个单元网格。

### 1.3 数值解法及边界条件

对于气固两相流冷态模拟,研究人员曾提出多种方法,应用较为广泛的是混合多相模型和欧拉多相模型,本文采用精度较高的欧拉-拉格朗日法处理气化炉反应区域多相流模拟。炉内料层可视作各向同性均匀多孔介质模型<sup>[10]</sup>,根据原料堆积密度与稻壳自身密度关系得出填料层孔隙率为 0.3,再根据稻壳自身密度计算得出其当量直径为 3.12 mm。在多相流模拟中,将料层设置为稻壳属性填充。采用多孔介质模型来仿真料层结构,多孔介质具有粘性阻力和惯性阻力,粘性阻力为渗透率的倒数

$$\frac{1}{a} = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (3)$$

式中  $a$ ——渗透率  $D_p$ ——颗粒当量直径  
 $\varepsilon$ ——床层空隙率

惯性阻力的计算公式可以用渗透率的计算公式来表达

$$c_2 = \frac{3.5}{D_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (4)$$

气化炉内压力采用表压。利用 Fluent 软件对单层炉和双层炉模型进行对比模拟分析。在料层中轴线上自底部向上设置 4 层 12 个压力监测点,由上至下各层压力监测点基本处于干燥层、热解层、氧化层

及还原层的相应位置,其高度如图1所示,且各点的径向距离相等。各项收敛参差精度设置为 $10^{-3}$ ,达到收敛时连续相及速度都达到了 $10^{-4}$ 。

## 2 仿真结果与实验验证

模型选取炉侧配风管水平对吹,基于同向均匀多孔介质模型的设定,在结果云图中只取炉体正中轴切面显示压力场和气流场。图2为收敛后单层配风工况下料层纵向压力云图,压力集中于料层上部1/4区域;图3为双层配风工况下料层纵向压力云图。从图2中看到,压力集中区域不再明显,且图1中所显示的炉体上方压力集中区域的压力值有所减弱。

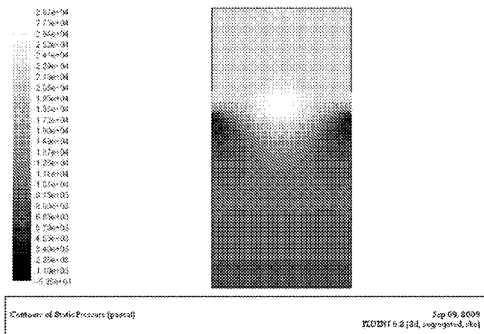


图2 单层配风工况气化炉床层压力云图

Fig. 2 Contours of static pressure in single-layer air duct gasifier

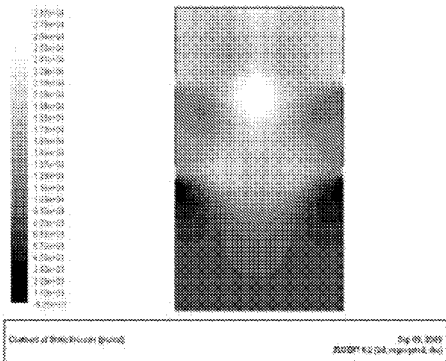


图3 双层配风管气化炉床层压力云图

Fig. 3 Contours of static pressure in double-layer air duct gasifier

应用气化炉多点测压实验验证模拟的准确性时,根据模型的监测点位置,应用美国基康公司生产的4500MLP型测压管,在气化炉中对12个监测点压力进行冷态检测,实验时,压力管进入以稻壳为原料的气化炉内部0.6 m,待压力稳定以后记下数据并与模拟值进行比较,测压位置与图1中模拟分析中的测压点相对应。气化炉测压实验位置如图4所示。

气化炉4排测压点位于实际运行炉内的4个反应层,实验值和模拟值描述了各层在不同配风条件

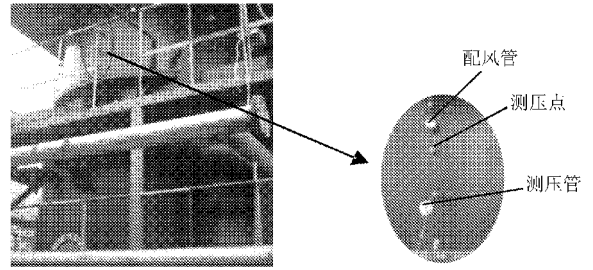


图4 气化炉及其测试点

Fig. 4 Gasifier and its test points

下的压力。实验与模拟的误差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_s - x_m)^2}{n}} \quad (5)$$

式中  $x_s$ ——实验值  $x_m$ ——模拟值  
 $n$ ——测点数

计算 $\sigma$ 时剔除最大偏差,分别代入各层测得的压力数据,求得相应的绝对误差和相对误差结果,经计算得:干燥层误差为0.12 kPa(0.52%),热解层0.15 kPa(0.95%),氧化层0.16 kPa(1.18%),还原层0.18 kPa(2.47%)。氧化层、还原层误差相对较大,这是因为生物质散料在炉内分布不均匀,处于气化炉下方的床层密度较高,不能完全满足各向同性均匀多孔介质模型。

对比曲线图及误差分析说明模拟压力值与实际压力值相差不大。多孔介质模型可以对实际工况进行仿真分析。

在双层配风工况下,气化炉内部氧化层、还原层和热解层的压力高于单层管配风,而干燥层则相反,图5所示的轴向压力值曲线,在距炉排0.3~1 m处双层配风的实验和模拟曲线均位于单层配风上方,其结果与模拟结果相一致。

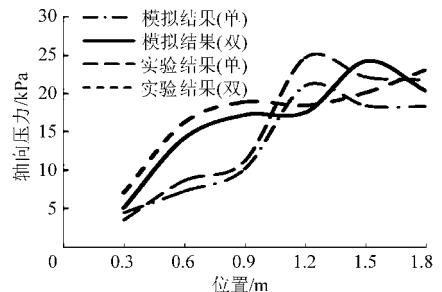


图5 各层压力实验值与模拟值比较曲线

Fig. 5 Comparison of the experimental and simulation data

生物质气化过程中,氧化层和还原层是产生燃气的核心区域。反应动力学认为,气化过程是一个复杂反应过程,反应动力学关系式为

$$\omega = \frac{k}{(RT)^3} A_1^2 A_2 p^{n-1} \quad (6)$$

式中  $\omega$ ——反应速率  $R$ ——气体常数

$A_1$ ——氧气的相对浓度

$A_2$ ——原料的相对浓度

$T$ ——反应物的温度

在反应物浓度和反应温度一定时, 气化反应速率与反应区域压力的  $n-1$  次方呈正比。氧化层的压力提高有利于氧化反应速率的加快, 在气化剂停留时间不变的情况下, 反应过程更加完全, 提高了氧化区的温度; 使还原区温度升高, 并且在压力增加条件下, 还原区反应速率加快, 基于以上两点, 根据文献[11]所述, 压力值增加, 生物质燃气中可燃组分将有所提高, 并且有利于降低出炉燃气的焦油含量。

### 3 结果分析

通过流速场分析, 可研究单、双层配风工况气化炉内压力场产生变化的原因。

根据伯努利方程<sup>[12]</sup>, 流速与压力呈反比。由图 6 单层炉内气流场可以看出, 配风口进风速度快, 且气化炉出口压力为负压, 因此, 气化剂流速场集中于下方的热分解层和氧化还原层, 干燥层区域气流速度较低。

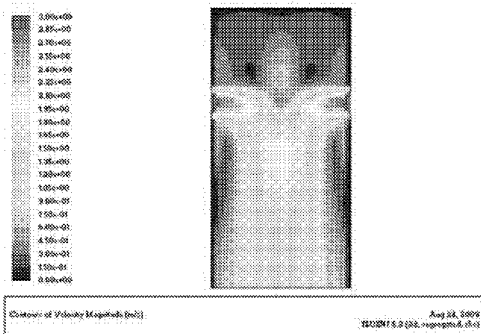


图 6 单层配风管气化炉料层内部流场云图

Fig. 6 Contours of velocity in single-layer air duct gasifier

双层炉内气流场如图 7 所示。由于一部分气化剂由上层管供给, 下层配风管进气量减少, 料层内气化剂流速趋向平均。以此推断, 压力场模拟结果中双层配风管气化炉内气化层下方压力增大的因素主要是上下配风管分流入风, 降低了热分解层以下部分空气流速。使得压力值提高。

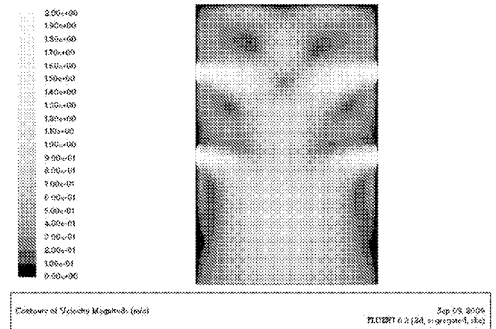


图 7 双层配风管气化炉料层内部流场云图

Fig. 7 Contours of velocity in double-layer air duct gasifier

### 4 结论

(1) 模拟和实验结果较为一致, 最大相对误差在 2.5% 以下, 表明欧拉多相流模型以及多孔介质模型相结合的方法可以计算生物质气化炉内部压力场。

(2) 双层配风状态下, 氧化层和还原层中压力比单层配风状态提高了 5 ~ 10 kPa。

(3) 根据反应动力学理论和温度对气化反应影响机理, 间接得出氧化区和还原区压力的提高对优化燃气组分的作用。

(4) 基于冷静态工况进行了模拟研究, 对于实际运行过程中的热态情况, 可利用本研究的模拟方法, 通过改变孔隙率及相关温度参数进行模拟, 因此为热态模拟过程计算模型的选择提供了依据。

### 参 考 文 献

- 1 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91 ~ 99.  
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqiu, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91 ~ 99. (in Chinese)
- 2 黄亚继, 金保升, 仲兆平, 等. 气化压力对煤气化过程中痕量元素迁移规律的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(1): 92 ~ 96.  
Huang Yaji, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Effect of gasification pressure on the occurrence of trace elements[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(1): 92 ~ 96. (in Chinese)
- 3 吴学成, 王勤辉, 骆仲泱, 等. 气化参数影响气流床煤气的模型研究(1)——模型建立及验证[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(10): 1 483 ~ 1 489.  
Wu Xuecheng, Wang Qinhui, Luo Zhongyang, et al. Modeling on effects of operation parameters on entrained flow coal gasification (II): model prediction and analysis[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(10): 1 483 ~ 1 489. (in Chinese)

- 14 张全国,雷廷宙. 农业废弃物气化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006:209~211.
- 15 Carlsen H, Ammundsen N, Traerup J. 40 kW stirling engine for solid fuel[C]//Energy Conversion Engineering Conference, 1996. Proceedings of the 31st Intersociety, IEEE: 1996,2:1 301~1 306.
- 16 Gaun A, Schmutzter E. Biomass-fuelled stirling micro combined heat and power plants [C] // ICCEP'07 International Conference on Clean Electrical Power, IEEE, 2007:429~432.
- 17 翁一武,苏明,翁史烈. 先进微型燃气轮机的特点与应用前景[J]. 热能动力工程,2003,18(2):111~116.  
Weng Yiwu, Su Ming, Weng Shilie. Specific features of advanced micro gas turbines and their application prospects[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(2):111~116. (in Chinese)
- 18 Francisco J, Antonio C, Jose C. Biomass based micro-turbine plant and distribution network stability[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(17):2 713~2 727.
- 19 Cano A, Jurado F, Carpio J. Modelling of power plants based on gasifier/gas turbine technologies [C]. 2002 IEEE Africon—6th Africon Conference in Africa, 2002,2:797~802.
- 20 黄艳琴,阴秀丽,吴创之. 生物质气化高温燃料电池一体化发电技术[J]. 可再生能源,2006(6):43~47.  
Huang Yanqin, Yin Xiuli, Wu Chuangzhi. Status of integrated biomass gasification and fuel cell power generation system [J]. Renewable Energy Resources, 2006(6):43~47. (in Chinese)
- 21 Gomez M, Jurado F. Feasibility of fuel cell systems using forest residues[R]//Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007:1~7.
- 22 Kirubakaran A, Shailendra Jain, Nema R K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(9):2 430~2 440.
- 23 中国能源年鉴编辑委员会. 中国能源年鉴 2005/2006[M]. 北京:科学出版社,2007:256.
- 24 吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报,2009,40(1):91~99.  
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqi, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):91~99. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 97 页)

- 4 Liu Guisu, Tate A G, Bryant G W, et al. Mathematical modeling of coal char reactivity with CO<sub>2</sub> at high pressures and temperatures[J]. Fuel,2000,79(10):1 145~1 154.
- 5 车丽娜,王维新. 上吸式生物质气化炉的建模和模拟[J]. 农机化研究,2008(8):55~57.
- 6 Sadaka S S, Ghaly A E, Sabbah M A. Two phase biomass air-steam gasification model for fluidized bed reactors: part I—model development[J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 22(6): 436~441.
- 7 高杨,肖军,沈来宏. 串行流化床生物质气化制取富氢气体模拟研究[J]. 太阳能学报,2008,29(7):894~899.  
Gao Yang, Xiao Jun, Shen Laihong. Hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008,29(7):894~899. (in Chinese)
- 8 Carlos R Altafini, Paulo R Wander, Ronaldo M Barreto. Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(17): 2 763~2 777.
- 9 Franco C, Pinto F, Gulyurtlu I, et al. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process[J]. Fuel, 2003,82(7):835~842.
- 10 肖军,沈来宏,郑敏,等. 基于 TG-FTIR 的生物质加压热解实验研究[J]. 太阳能学报,2007,28(9):972~978.  
Xiao Jun, Shen Laihong, Zheng Min, et al. TG-FTIR analysis of pressurized pyrolysis of biomass[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007,28(9):972~978. (in Chinese)
- 11 Mathieu P, Dubuisson R. Performance analysis of a biomass gasifier[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9~12):1 291~1 294.
- 12 管国锋,赵汝溥. 化工原理[M]. 北京:化学工业出版社,2003.