

# 流化床热解反应器布风系统数值模拟研究

吴 兴, 马善为, 李 凯, 朱锡锋

(中国科学技术大学安徽省生物质洁净能源重点实验室, 中国科学院城市污染物转化重点实验室, 合肥 230026)

**摘 要:** 在常见生物质流化风速范围内, 利用 Fluent 软件对流化床热解反应器的布风系统进行数值模拟研究, 结果表明: 在风室底部风速呈现出中间高于两侧的不一现象; 送风管道进口流量越大, 风室临界高度值越大; 蘑菇形风帽内部结构较为简单, 阻力主要集中在进出口部位, 开孔率和进口尺寸与风帽的阻力呈负相关关系, 出口孔的排布形式不影响风帽的阻力特性, 但对床内流场有较大影响; 从阻力-流量关系的角度看, 布风板上的风帽相当于并联关系, 但风帽的排布方式对床内流场有很大影响, 在开孔率相同的情况下, 三角形排布更有利于床层内流场的均匀分布。

**关键词:** 流化床; 布风系统; 蘑菇形风帽; 布风板; 数值模拟

**中图分类号:** TQ021.1

**文献标识码:** A

## 0 引 言

生物质热解液化技术可将低品质的生物质转换为高品质的生物油, 以制取燃料或化工产品, 被认为是最具发展潜力的生物质能转换利用技术之一<sup>[1]</sup>。在生物质热解液化机组中, 热解反应器作为核心部件, 它的运行方式决定了液化技术的种类, 也决定着整个热解过程的功效<sup>[2]</sup>。生物质快速热解技术研究的基础和关键是如何开发出高效、稳定的热解反应器。目前, 流化床式热解反应器因其不含运动部件, 结构较为简单, 工作可靠, 运行寿命长等优点得到了更为广泛的应用<sup>[2]</sup>。布风系统是流化床热解反应器的核心部件之一, 主要由送风管道、风室和布风板组成, 其设计是否合理关系到流化床内气流分布是否均匀, 从而影响床层内物料的流化及传热传质特性, 而物料的正常流化是反应器安全、平稳和经济运行的关键。相比于直孔型布风板, 风帽型布风板以布风均匀稳定、防漏性能好和寿命长等优点具有着更好的应用前景。但迄今为止, 对于风帽型布风板的研究主要集中在大尺度的流化床锅炉上, 结果表明选用合适的风帽型布风板可大大提升高炉的效率和稳定性。但风帽式布风板能否应用到小尺度的流化床热解反应器上, 还需要具体

的研究。

实验研究由于测量复杂、周期长、成本高等问题受到了很大的限制。而计算流体力学分析(CFD)是一种方便可靠的分析流场的手段, 具有灵活性好、实验周期短和经济高效等优点<sup>[3]</sup>, 现已在流化床布风系统的设计领域有了一定的应用。文献[4]利用 CFD 对 Glatt GPCG-1 流化床涂层器的两种丝网型布风板进行了模拟, 将丝网型布风板看做多孔介质处理, 其计算结果与实验数据基本一致, 在此基础上, 研究了反应器结构变化对布风板来流的影响。Dhotre 等<sup>[5]</sup>利用 CFD 对风室和鼓泡塔耦合系统进行三维模拟, 确定了布风板入口喷嘴的最佳尺寸、安装位置和开孔面积。李少华等<sup>[6]</sup>利用 Fluent 软件对流化床内不同布风板形式的空气流场进行模拟, 研究了布风板结构对流化床炉膛内气流分布的影响。但这些研究主要集中在直孔型布风板和各种类型的单风帽上, 目前鲜有文献对完整的风帽型布风板进行模拟研究。本文以自行设计的流化床热解反应器为基础, 利用 CFD 手段和分区域网格划分的方法对反应器的风室、蘑菇型风帽和风帽型布风板进行研究, 以为布风系统的设计提供参考。

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2013CB228103); 中国科学院重点部署项目(KGZD-EW-304-3)

通信作者: 朱锡锋(1962—), 男, 博士、教授, 主要从事生物质热解液化和生物油精制应用等方面的研究。xfzhu@ustc.edu.cn

## 1 实验模型的构建

本文对自行设计的流化床热解反应器的布风系统(图1)进行模拟计算,送风管道圆管内径 40 mm,锥形扩散管锥角 45°,流化床床体内径 140 mm,布风板安装位置高度  $H$ (mm)是本次模拟待定值。送风管道上球阀 1 用于调节送风量,球阀 2 用来解决停机时可能出现的少量漏渣问题。

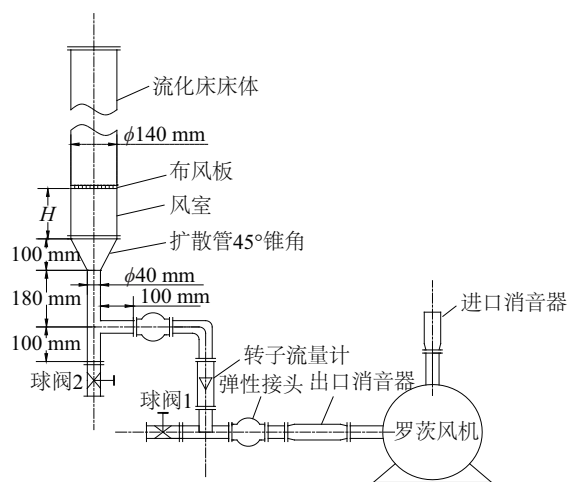


图1 流化床热解反应器布风系统

Fig. 1 Air distribution system of fluidized bed pyrolysis reactor

模拟整个布风系统时的网格划分较为复杂,计算工作量过大,因此将其拆分为两部分进行计算。第1部分模型由送风管道和风室组成,选取扩散管出口 0.5 m 段的部分作为风室进行模拟计算,利用 gambit 分区域划分六面体结构化网格,网格模型如图 2a 所示。通过对管道和风室内流场的分析,确定合理的风室高度和布风板的安装位置;第2部分由风室,风帽型布风板和床体组成,对于中小型实验装置,通常物料在布风板上部 0.2 m 的范围内反应剧烈,转化率较高<sup>[7]</sup>,因此选取布风板以上 0.2 m 段床体进行模拟分析,利用 gambit 分区域划分网格时,考虑布风板风帽部分结构复杂,采用非结构型四面体网格,下部风室和上部床体部分都采用六面体结构化网格。通过对单风帽情况下的流场进行分析,研究风帽内部结构(包括进出口孔径、出口孔数,孔的排布等)和入口风速对单风帽阻力特性的影响,所采用的单风帽几何结构尺寸及参数见图 3a 和表 1,网格模型如图 2b 所示;选取风帽 6 为模拟对象,对布风板阻力特性进行研究,网格模型如

图 2c 所示。在研究风帽阻力特性的基础之上,重点考虑风帽数量、布风板开孔率和风帽布置方式等因素,4 种布风板形式如图 3b 所示。研究的目的是为了尽可能维持布风的均匀稳定,增强床中气固两相接触和传热传质效率,实现流化床热解反应器的高效运行。

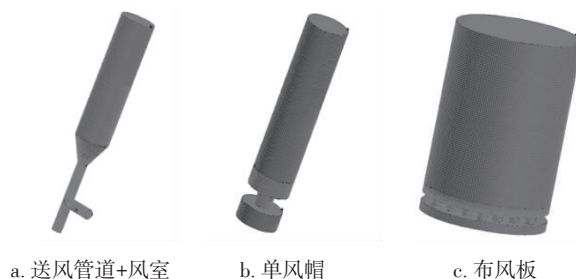
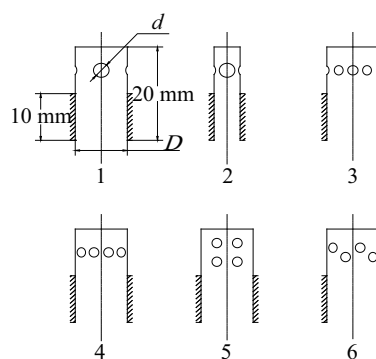
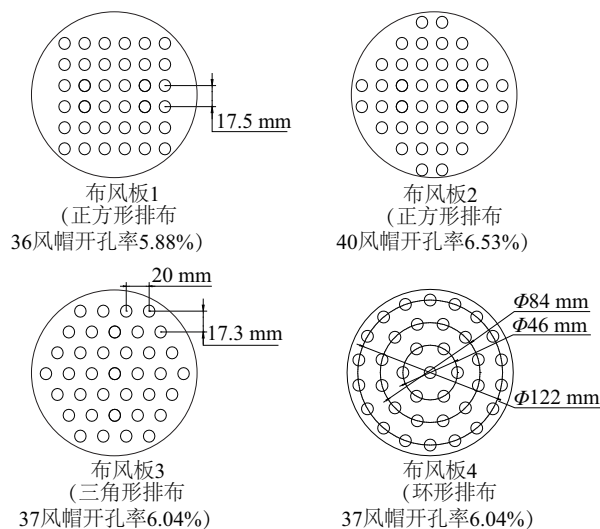


图2 网格模型

Fig. 2 Mesh model



a. 6种结构类型的蘑菇形风帽



b. 安装风帽6的4种布风板

图3 几何结构

Fig. 3 Geometric structure

表 1 几种风帽的几何结构尺寸及参数					
Table 1 The geometric structure size of several kinds of caps					
序号	进口直径 $D/\text{mm}$	出口形式		开孔率/%	
		直径 $d/\text{mm}$	孔数 孔排布形式		
1	10	3	4 单排	5.76	
2	5	3	4 单排	5.76	
3	10	2	9 单排	5.76	
4	10	2	8 单排	5.12	
5	10	2	8 双顺	5.12	
6	10	2	8 双错	5.12	

## 2 数值计算方法

本文在常温常压下对上述模型进行单一的气相流场模拟,气体密度 $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$ ,动力黏度 $\mu=1.79\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。单一气相体系采用稳态流隐式求解,考虑到流场中可能会出现旋流,故黏性方程采用基于重整化群(renormalization group, RNG)

方法推导的 RNG  $k\text{-}\varepsilon$ 湍流模型<sup>[3]</sup>,以提高精度,便于更好的捕捉可能出现的旋流,压力速度耦合采用 Simple 算法,动量离散方程采用二阶迎风格式。

表 2 列出了几种常用生物质原料的特性参数<sup>[2]</sup>,从这几种生物质原料的临界流化速度和终端沉降速度可看出,常见生物质颗粒的流化操作范围在 0.5~3.0 m/s 之间,故模拟计算都在该风速范围内完成。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 风室场分析

从风室中出来的气体经布风板整流后进入床层的过程中,要想获得均匀的气体分布,首先必须要保证布风板下部风室来流的均匀性。经验表明,风室风速愈不均匀,所需布风板的整流阻力越大,功耗也就越大。因此在对布风板的阻力特性研究之前,有必要对风室内的流场进行分析。

表 2 生物质特性参数							
Table 2 Biomass characteristic parameters							
种类	平均直径/ mm	堆密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	视密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙率/ %	Geldart 分类	临界流化速度 $U_{\text{m}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	终端沉降速度 $U/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
木屑	0.78	150~200	570.3	57.7	B	0.63	3.31
花生壳	0.61	200~250	566.8	55.9	B	0.53	2.92
椰子壳	0.98	400~450	547.9	21.5	B	0.56	3.64
稻壳	1.5	100~140	630.1	80	D	1.50	4.83

注:1.临界流化速度由欧根公式计算而来;2.终端沉降速度由牛顿定律计算而来。

图 4 是风室表观风速( $u_0$ )为 0.5 m/s 时的压力和速度剖面云图。压力云图(图 4a)表明,压力只在三通管和扩散管处存在较大的变化,而在整个风室内流体静压分布均匀,且保持着很好的稳定性,从而可以避免反应器运行过程中常见的漏渣现象。速度云图(图 4b)还表明,风室内部流场由于受到入口和风室内部结构的影响,经扩散管进入风室的气流速度在底部呈现中间大、两边低的射流结构,只有经过扩散,到达一定的风室高度后才能呈现均匀分布。

图 5 为风室内不同高度处气体垂直方向速度( $V_z$ )的径向分布, $r/R$ (径向位置与床体半径之比)为无量纲径向位置。引入临界风室高度( $h$ )的概念,即风室出口能起到均匀分布气体并具有良好的稳定性

的最小高度,这一工况下临界风室高度为 0.3 m。

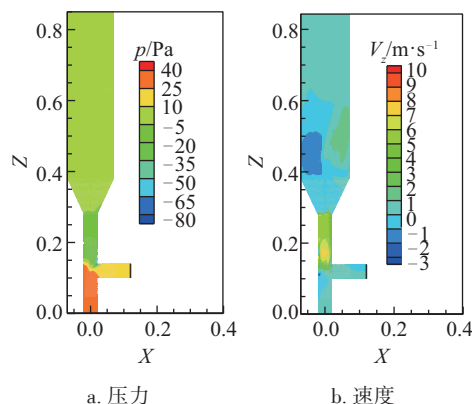


图 4 送风管道及风室的压力和速度剖面云图  
Fig. 4 Air supply pipeline and the wind chamber pressure and speed profile chart

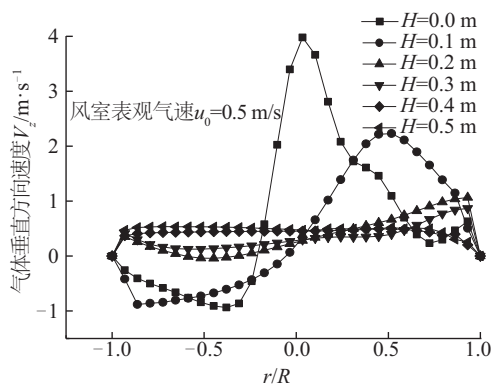


图5 不同风室高度处垂直方向气速的径向分布

Fig. 5 Radial distribution of gas velocity in vertical directional different wind chamber height

而后,根据表2所给的生物质颗粒流化操作范围,气速从0.5 m/s递增至3.0 m/s进行系列模拟,气体动压是气速的二次方量,因此,以面积为权重的截面平均动压可以很好地反映气体的均匀性。对这几种工况下不同风室位置高度的截面平均动压进行统计,结果如图6所示。从图6可看出,随着风室位置高度的增大,截面平均动压逐渐降低,流场分布逐渐趋于均匀。并且气速越大,趋于均匀的趋势越慢,临界风室高度越大。基于以上分析,布风板的安装高度 $H$ 应大于0.4 m。

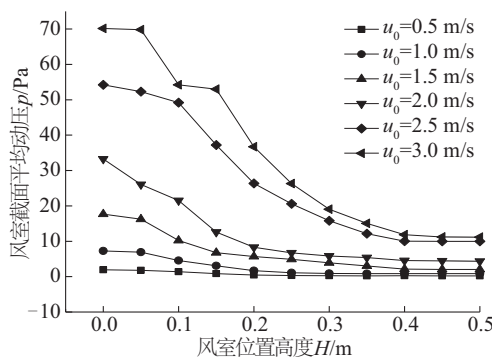


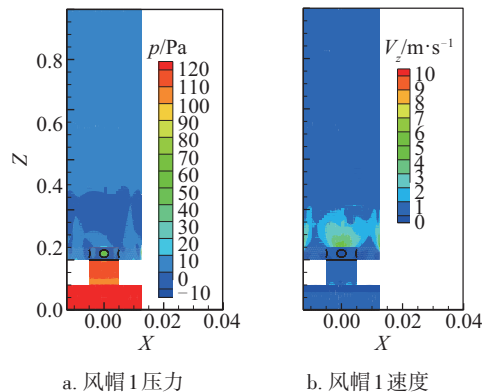
图6 不同表观气速下风室截面平均动压随位置高度的变化

Fig. 6 Effects of the wind chamber height on its section average dynamic pressure under different superficial gas velocity

### 3.2 单风帽的流场分析与阻力特性

图7是风帽1在 $u_0=0.5$  m/s时的压力和速度剖面云图。压力云图表明,对蘑菇型风帽而言,在气体流经风帽的过程中,风帽出口处的压力远大于床

体内的压力,可有效防止漏渣;压降主要出现在风帽的入口和出口处,由于风帽内部结构较为简单,只需调整风帽的进出口形式及尺寸即可控制整个风帽的阻力大小。速度云图表明,风帽出口处具有较高的气速,也可起到防止漏渣的作用;而在床体下部,从风帽中喷射出的气体由于流向的改变会产生很多较小的涡流,这对底部物料的流化是非常有利的。在对风帽1分析研究的基础上,对表1中其他几种风帽进行相同的模拟。对各风帽的内部阻力压降进行分析统计,得到蘑菇形风帽内部阻力分配图,见图8。对比风帽1和风帽2可知,由于风帽2入口直径是风帽1的一半,导致入口段局部阻力系数增大,同时在流量不变的情况下入口段和直管段的流速变大,使得入口段和直管段的阻力都有显著的增大,风帽内部阻力分配向入口段和直管段发生了明显转移;对比风帽3和风帽1可知,在开孔率不变的情况下,减小风帽出口孔径,出口段的局部阻力系数会有所增大,从而使得出口段的阻力份



a. 风帽1压力 b. 风帽1速度

图7 风帽1的压力和速度剖面云图

Fig. 7 Profile chart of pressure and speed of the cap 1

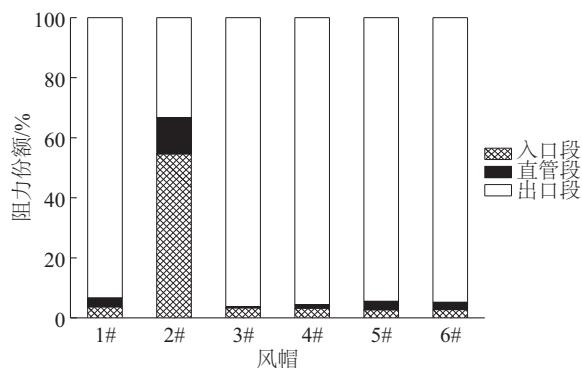


图8 蘑菇形风帽内部阻力分配图

Fig. 8 Diagram of internal resistance distribution of mushroom cap



额有所增大;对比风帽 4、风帽 5、风帽 6 可知,风帽出口孔的排列形式的变化不会明显影响出口段的阻力份额。

空气作为风帽内部的流动介质,其性质和状态直接影响着风帽的阻力特性。下面讨论空气流量对蘑菇形风帽压降的影响作用。

通过数值计算得到 6 个风帽的阻力与流量的关系,即冷态阻力特性曲线,如图 9 所示。从图中可看出,风帽压降与风帽进口风量呈二次曲线变化,尤其在进口风量处于大流量区时,进口风量稍有变化会引起风帽阻力的显著变化。

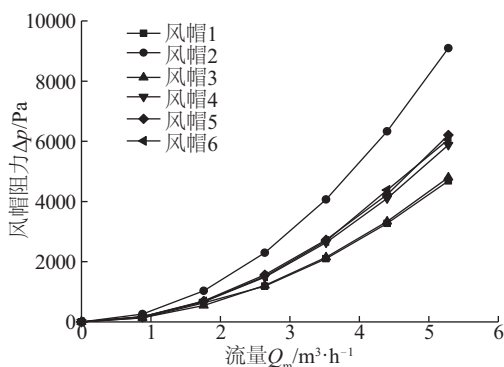


图9 风帽冷态阻力特性曲线

Fig. 9 Curve of the cap cold resistance characteristic

在实际运行中,风帽进口处风量的脉动会引起通过风帽的流量变化,使得布风板各风帽间的阻力存在较大差异,如果风帽阻力系数过小,就会造成风帽流量分布不均的正反馈,使得通过部分风帽的流量越来越大,而通过其他风帽的流量会相对减小,从而造成布风不均,如果再进一步恶化,部分风帽会被床料压死,进而出现风帽漏渣现象<sup>[7-9]</sup>。

风帽阻力系数  $\xi$  为:

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \quad (1)$$

式中,  $\Delta p$  ——风帽阻力, Pa;  $\rho$  ——空气密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $v$  ——风帽出口小孔上的平均流速, m/s。

风帽出口处的雷诺数  $Re$  为:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (2)$$

式中,  $\mu$  ——空气动力粘性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $l$  ——风帽小孔直径, m。

图 10 所示为不同雷诺数下风帽的阻力系数,从图中可见,风帽 4、风帽 5、风帽 6 的阻力系数相差不大,且受  $Re$  的变化影响较小,说明这 3 个风帽

在该  $Re$  范围内处于自模化区,阻力系数只与其自身内部结构有关。对这 3 个风帽作用下的床内流场动压进行分析研究,得到风室表观气速  $u_0=0.5 \text{ m/s}$  时 3 种风帽不同床体位置高度处截面平均动压的变化曲线,如图 11 所示。可看出,当床体位置高度大于 0.05 m 时,3 个风帽的截面平均动压等于 0.15 Pa,且不随高度增加而变化,说明该部分流场均匀。而在床体底部,风帽 6 的床内截面动压更小一些,床内流场更接近均匀状态。阻力系数计算和流场分析表明:风帽小孔布置方式虽然不影响风帽的阻力压降,但对于床内流场影响显著,采用双排交错排布方式的风帽 6 更有利于床内气流的均匀分布和床料的流化。

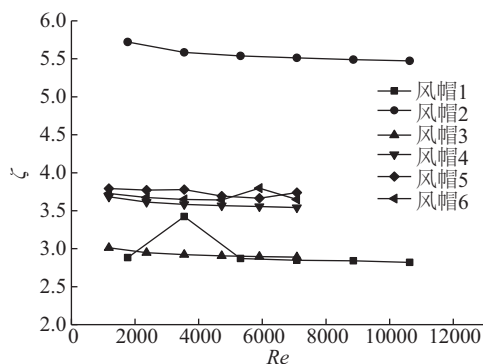


图10 风帽阻力系数 $\xi$ -雷诺数 $Re$ 曲线

Fig. 10 Curve of cap drag coefficient and Reynolds number

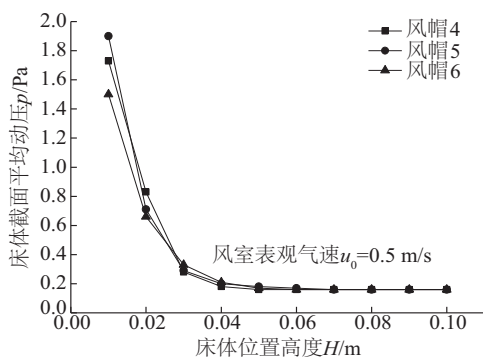


图11 不同床体位置高度处截面平均动压的变化

Fig. 11 Cross section average dynamic pressure at different bedheight

### 3.3 布风板的流场分析与阻力特性

通过数值计算得到的 4 个布风板的阻力与流量的关系,即冷态阻力特性曲线,如图 12 所示。可看出,与风帽的阻力特性曲线类似,布风板的阻力与其进口风量也呈二次曲线变化,同开孔率的三角

形和环形排布的两种布风板的阻力与流量曲线基本重合。布风板开孔率越小,布风板阻力越大,且随着流量的增大阻力增大越快。布风板的阻力与板上的风帽布置方式无关,从阻力流量关系的角度看,可以认为板上的风帽相当于并联关系。

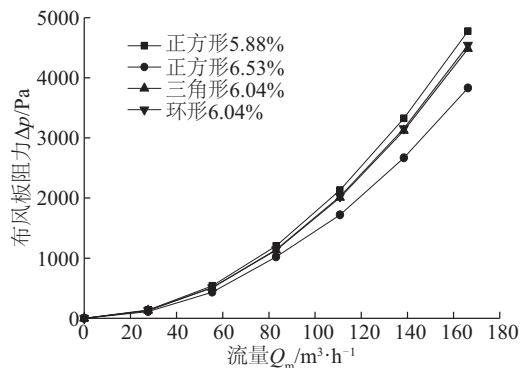


图 12 布风板冷态阻力特性曲线

Fig. 12 Curve of air distributor cold resistance characteristic

风室表观气速  $u_0=0.5$  m/s 时 4 种布风板不同床体位置高度处截面平均动压的变化曲线如图 13 所示。可以看出,随着床体位置高度的变化,开孔率为 6.04%,风帽呈正三角形排布的布风板床内截面平均动压下降最快,说明随着位置高度的上升气体能够更早的分布均匀,更有利于床内物料的流化。因此,选取这种结构的布风板作为流化床热解反应器的布风板。

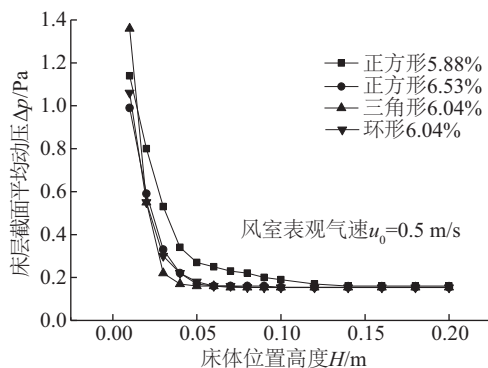


图 13 不同床体位置高度处截面平均动压的变化

Fig. 13 Cross section average dynamic pressure at different bed height

## 4 结 论

1) 送风管道中的气流经扩散管调整进入风室,在整个风室内各部位的静压基本上是相等的,而在风室底部风速呈现中间高于两侧的不一现象,只

有在临界风室高度以上风速才能均匀分布,且进口流量越大,临界风室高度越大。

2) 风帽的阻力特性受风帽内部结构和流动介质特性的影响。蘑菇形风帽内部结构较简单,阻力主要集中在进出口部位所产生的局部阻力,只需调整风帽的进出口的尺寸即可控制整个风帽的阻力大小,开孔率和进口尺寸与风帽的阻力表现为负相关关系;风帽出口孔的排布形式不影响风帽的阻力特性,但对床内流场有较大影响。

3) 对安装有风帽 6 的 4 种布风板进行模拟计算,表明布风板风帽越少,开孔率越小,布风板阻力越大,且随着流量的增大阻力增大越快。布风板阻力与板上的风帽布置方式无关,从阻力流量关系的角度看,可认为板上的风帽相当于并联关系,但风帽的排布方式对床内流场有较大的影响,在开孔率相同的情况下,三角形排布更有利于流场的均匀分布。

4) 通过对布风系统的数值模拟研究,确定布风板的安装位置高度  $H$  应大于 0.4 m,选取安装有 37 个风帽 6、开孔率为 6.04%、正三角形排布的布风板作为生物质热解流化床装置的布风系统。

## [参考文献]

- [1] 杜洪双, 常建民, 王鹏起, 等. 木质生物质快速热解生物油产率影响因素分析[J]. 林业机械与木工设备, 2007, (3): 15—20.
- [1] Du Hongshuang, Chang Jianmin, Wang Pengqi, et al. Analysis of influence factors on wooden biomass pyrolysis liquefaction [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2007, (3): 15—20.
- [2] 朱锡锋. 生物质热解原理与技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.
- [2] Zhu Xifeng. Biomass pyrolysis principle and technology [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2006.
- [3] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [3] Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis: The principle and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [4] Depypere F, Pieters J G, Koen Dewettinck, et al. CFD analysis of air distribution in fluidised bed equipment [J]. Powder Technology, 2004, 145(3): 176—189.
- [5] Dhotre M T, Joshi J B. Design of a gas distributor:

- Three-dimensional CFD simulation of acoupled system consisting of a gas chamber and a bubble column [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 125 (3): 149—163.
- [6] 李少华, 张 锐, 车德勇. 流化床布风板结构对流场影响的数值模拟研究[J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(5): 39—42.
- [6] Li Shaohua, Zhang Rui, Che Deyong. Numerical simulation of fluidized bed air distribution plate structure of the flow field affects[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2014, 34(5): 39—42.
- [7] 赵 弦. 循环流化床布风板的冷态模化试验及数值模拟[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2005.
- [7] Zhao Xian. Experiments and numerical simulation on the resistance characteristics of the air distributor in the circulating fluidized bed boiler[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [8] 王文仲, 吕清刚, 贺 军, 等. 内嵌逆流式柱形风帽的实验与数值模拟研究[J]. 锅炉技术, 2011, 42(3): 39—42.
- [8] Wang Wenzhong, Lyu Qinggang, He Jun, et al. Column air button with inner tube: Experimental and numerical study [J]. Boiler Technology, 2011, 42(3): 39—42.
- [9] 易晓江. 循环流化床锅炉风帽阻力特性及防漏特性的实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2010.
- [9] Yi Xiaojang. Experimental study on air caps and leakage in circulating fluidized bed boiler[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2010.

## NUMERICAL SIMULATION OF AIR DISTRIBUTION SYSTEM IN FLUIDIZED BED PYROLYSIS REACTOR

Wu Xing, Ma Shanwei, Li Kai, Zhu Xifeng

(Anhui Province Key Laboratory of Biomass Clean Energy, CAS Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** In the common biomass fluidization gas speed range, the numerical simulation of air distribution system of fluidized bed pyrolysis reactor was carried out using Fluent software. The results show that the gas speed at the bottom of the wind chamber shows an inconsistency phenomenon, the gas speed in the middle is higher than that in both sides, and the critical height of the wind chamber increases with the increase of inlet flow of the flue pipe; the internal structure of mushroom-cap is relatively simple, and its resistance mainly concentrate in the inlet and outlets. The cap resistance has a negative correlation with the perforated ratio and the inlet size, the arrangement of the outlets doesn't affect the resistance characteristics of wind cap, however, there is significant effect on the flow field in the bed. From the point of view of resistance-flow relationship, the wind cap on the air distribution board is equivalent to the parallel connection, but the arrangement of wind cap has a great influence on the flow field in the bed. In the case of the same opening rate, the triangular arrangement is more conducive to the uniform distribution of the flow field in the bed.

**Keywords:** fluidized bed; air distribution system; mushroom-cap; air distributor; numerical simulation