

导向管喷动床中煤和稻秸粒混料的流动特性试验*

刘伟民¹ 张 建¹ 刘 军¹ 王立群² 赵如金³ 赵杰文¹

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013;
3. 江苏大学环境工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 将导向管喷动床改进为煤粒和稻秸粒混料气化设备,通过导向管喷动床内进行的稻秸粒与煤粒混合物料冷态流动特性试验,给出喷动的流体力学条件。研究了床层压降随表观风速的变化规律,稻秸粒和煤粒混合比例、喷口直径和导向管喷口间距3因素对床层压降与表观风速关系曲线的影响以及对物料循环速率与风量关系曲线的影响。进行了3因素12拟水平的均匀设计试验,采用SPSS软件进行回归分析,分别得到了物料循环速率、单位床高压降及单位有效功率的物料循环速率3个因变量各自与稻秸粒和煤粒混合比例、导向管喷口间距及喷口直径3个自变量之间关系的多元回归方程,用于预测稻秸煤粒混料在导向管喷动床中喷动时的流体力学参数。

关键词: 生物质 气化 喷动床 流动特性 模型
中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)10-0107-05

Flow Characteristics of Straw with Coal in Draft Tube Spouted Bed

Liu Weimin¹ Zhang Jian¹ Liu Jun¹ Wang Liqun² Zhao Rujin³ Zhao Jiewen¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
3. School of Environmental Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

To develop a draft tube spouted bed (DTSB) for gasification of straw with coal, flow characteristics of the mixture in DTSB before co-gasificating should be studied to get the spouting conditions. The relationship of pressure drop of the bed with superficial air velocity was analyzed, as well as the effects of various parameters such as proportion of mixture, jet diameter and draft tube jet distance (DTJD) on it and the relationship of the circulating rate of the mixture with superficial air velocity. Three regression equations were got by $U_{12}(12^3)$ uniform design experiments and multiple variable linear regression using SPSS. The dependent in these equations's was circulating rate of the mixture, pressure drop of unit material height, circulating rate of the mixture of per effective power respectively and the independents were all of proportion of mixture, spout diameter and DTJD. Three equations can be used to forecast hydrodynamic parameters of the mixture in the DTSB.

Key words Biomass, Gasification, Spouted bed, Flow characteristics, Model

引言

小型秸秆气化站^[1]气化气因热值低、含焦油等问题,应予改进。结合研究废弃物热解、喷动床^[2~3]和流化床生物质气化的经验^[4],提出用煤与秸秆粒

在喷动床中共气化,可增加热值和消除焦油。秸秆粒与煤共气化,可以促进煤的气化反应,同时煤的高温气化可消除焦油并产生高品位清洁的中热值燃气,可减量化使用煤炭。目前,生物质气化反应器主要有固定床和流化床气化炉等。近年流化床生物质

收稿日期: 2009-11-17 修回日期: 2010-03-30
* 江苏省社会发展科技计划资助项目(BS2006037)
作者简介: 刘伟民,教授,博士生,主要从事农产品加工技术研究,E-mail: liuwmwu@ujs.edu.cn

气化的相关研究日趋增多^[5-7]。喷动床是流化床的一个分支,具有结构简单,用气量小于流化床,易操作等优点。

导向管喷动床^[8-11] (draft tube spouted bed,简称 DTSB)是对喷动床的改进,它克服了普通喷动床轴向难以放大的缺点,可提高喷动床的生产能力。

为了研究导向管喷动床中秸秆粒和煤粒混料流动的基本问题,本文以稻秸粒和煤粒混料进行冷态的流体力学特性研究,并用均匀设计的研究方法建立模型。

1 试验

1.1 试验材料及设备

煤粒由无烟块煤破碎过 5 mm 孔筛后得到,平均直径约 3 mm,容积密度为 897.20 kg/m³;稻秸粒剪断长度为 4~8 mm,含水率(质量比)约为 10%,容积密度为 67.25 kg/m³;盘架秤:0~10 kg,精度 0.02 kg;自制导向管喷动床反应器,主要由风机(无锡中策机电设备有限公司)、温度控制仪(上海佳敏仪表公司)、导向管及喷动床(自制)等组成。喷动床柱体内径 400 mm,高 700 mm,底部锥角 60°,导向管内径 41 mm。床外管道内径为 53 mm,如图 1 所示。

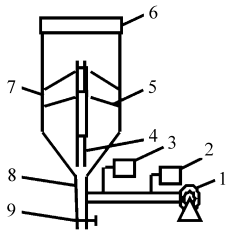


图 1 DTSB 示意图
Fig. 1 Sketch of the DTSB
1. 风机 2. 毕托管 3. 温控仪
4. 导向管 5. 固定杆 6. 除尘
7. 喷动床 8. 测压口
9. 出料口

1.2 试验方法

1.2.1 压降与风速关系测定

部分开启旁路阀,完全关闭进气阀。将计量的稻秸粒与煤粒的混合物料加入喷动床中,开启风机,控制进气阀,记录各流量下的温控仪、毕托管和床层压降读数。升速完毕后,逐渐降低风速,控制风量,分别记录温度、毕托管和床层压降读数,直至测完所需数据点。

1.2.2 物料循环速率测定

部分开启旁路阀和进气阀,打开风机,将风量调至稍大于设定值。将已计量的稻秸粒与煤粒的混料从喷动床顶部加入,然后调节进气阀至设定风量。待喷动稳定后,记录温度、全床压降。接着,用自制的取样器在物料喷射区持续取样 20 s,称量样品,记录样品质量。然后将取样倒回喷动床内,待系统稳定后继续取样,每个风量下重复取样 3 次求平均值。改变条件后重复上述步骤。

1.3 试验设计

先试验喷动现象,再进行单因素试验和均匀设计试验。实际气化时稻秸气化很快,煤粒较多,混合物的稻秸比例较低。另外流体力学试验也发现稻秸质量为 10%~30% 的混合物床层压降差异较小,故均匀设计试验时固定以 10% 稻秸粒的混料为原料,按照接近喷动床最大装料量(约 21 kg)装料,固定床层高度 0.5 m。重点考察喷口直径 A、风量 B、导向管喷口间距(导喷距 DTJD) C 等因素的影响,设计三因素三水平均匀试验,并采用拟水平法安排 U₁₂(12³)试验,测定相关条件下物料喷动时的循环速率及压降。均匀试验的因素水平如表 1 所示,其中风量为标准状态下的数值,经计算管道中实际流量的温度和压强综合校正系数约为 1.04。水平范围根据初步试验和经验选取。

表 1 均匀试验设计的因素和水平值
Tab. 1 Factors and levels of the uniform design experiments

水平	因素		
	喷口直径 A/m	风量 B/m ³ ·h ⁻¹	导喷距 C/m
1	0.033	73	0.06
2	0.025	54	0.08
3	0.041	92	0.04

2 结果与分析

2.1 喷动现象与压降变化规律

导喷距 60 mm、喷口直径 33 mm、物料高度 540 mm 时,30% 稻秸粒和煤粒混料的 DTSB 压降随表观风速(按喷口截面积计算,后同此)的变化曲线如图 2 所示。

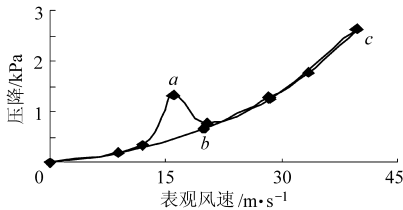


图 2 DTSB 床层压降-表观风速关系曲线
Fig. 2 Relationship between pressure drop of DTSB and superficial air velocity

随着风速的增大,床层压降逐渐增加,到 A 点时达到最大值 1.5 kPa,此为起喷压降。再增加风速,空气吹开喷口上方的物料,床层压降从 a 降至 b,但此时喷动状态不稳定,直至风速稍大于 b 点风速后,喷动才稳定。继续增加风速,床层压降继续增大。当风速由大至小调节时,床层压降也逐渐降低,随风量的不断减小,稳定喷动状态逐渐结束,但直到风量很小仍有少量稻秸粒从导向管中喷出,整个过

程压降随风速的变化没有明显波动,没有出现明显的最小喷动速度。压降曲线双向不重合,即喷动过程不可逆。

2.2 不同操作条件下压降与表观风速关系

2.2.1 混料比例

图 3 为导喷距 60 mm、物料高度 380 mm、喷口直径 25 mm 时含 30% (质量分数) 稻秸粒的混料和纯煤粒用于极限情形对比的 DTSB 床层压降随表观风速的变化曲线。

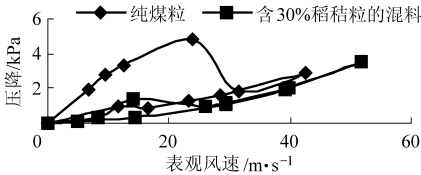


图 3 含稻秸粒混料和纯煤粒的压降-表观风速关系曲线
Fig.3 Relationship between pressure drop and superficial air velocity at different proportion of straw and coal

由于纯煤粒密度大,需要较大的压强才能克服导喷距高度床层的阻力而喷动,起喷压降达到 4.8 kPa。加入 30% 的稻秸粒的混料,床层密度大大变小,混料的整体结构比较松散,喷动容易发生,最大起喷压降已经降至 1.4 kPa。由于稻秸的密度小,体积大,实际气化时稻秸气化速度快,应少采用较大的稻秸比例。

2.2.2 导喷距

图 4 为物料高度 450 mm、喷口直径 33 mm 时,30% 稻秸粒和煤粒混料在两种导喷距下床层压降随表观风速的变化曲线。

随导喷距的增大,起喷压降增大,起喷风速也增大。在导喷距为 60 mm 时起喷压降为 1.3 kPa;在导喷距为 120 mm 时起喷压降为 1.4 kPa。试验表明,导喷距大于 160 mm 时试验风机风压要提高,实际使用会受到限制。导喷距低于 60 mm,混料的循环不畅,使用也受到限制。

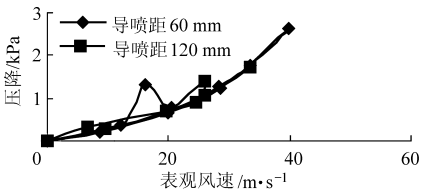


图 4 不同导喷距时喷动床压降-表观风速关系曲线
Fig.4 Relationship between pressure drop and superficial air velocity at different DTJD

2.2.3 喷口直径

导喷距 60 mm、物料高度 540 mm 时,30% 稻秸粒混料在不同喷口直径时的床层压降随表观风速的变化曲线如图 5 所示。

由图可知,喷口直径变大,起喷压降有降低的趋

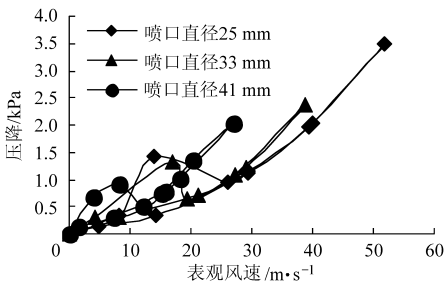


图 5 不同喷口直径时喷动床压降-表观风速关系曲线
Fig.5 Relationship between pressure drop and superficial air velocity at different jet size

势,并且所对应的表观风速降低。原因是喷口直径增加后,同样的风量下,喷口处的速度小,阻力小,有效风压大,容易喷动。但如果颗粒的沉降速度较大,大直径喷口形成的喷动速度可能达不到大于沉降速度的要求,可改用稍小直径的喷口,需要注意阻力有所增加。

2.3 不同操作条件下的物料循环速率与风量关系

2.3.1 混料比例

图 6 为导喷距 60 mm、物料高度 380 mm、喷口直径 25 mm 时,不同比例稻秸粒混料的循环速率与风量的关系曲线。

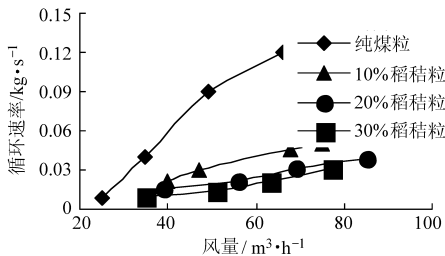


图 6 不同比例混料下固体循环速率与风量关系曲线
Fig.6 Relationship between solid circulating rate and air flow rate at different proportion of straw and coal

纯煤粒由于密度大,按单位时间内的质量流量计算的循环速率大。随着混料中稻秸比例的增加,相同风量下物料的循环速率逐渐减小。循环速率随风量的增大而增大。稻秸粒的密度远远小于煤粒的密度,参与循环的稻秸粒比例增大,总体质量会相对下降,循环量相应减小。混料中稻秸多,流动性就差,在一定程度上导致喷动床内物料从环隙区向喷动区移动减缓,循环量也减小。

2.3.2 导喷距

图 7 为物料高度 450 mm、喷口直径 33 mm 时,30% 稻秸粒和煤粒混料在不同导喷距下喷动床物料循环速率与风量的关系曲线。

导喷距在 60 ~ 120 mm 的范围内物料循环速率随导喷距变大而变大,导喷距为 40 mm 时的物料循环速率较低。这是因为导喷距太小时,物料进入导

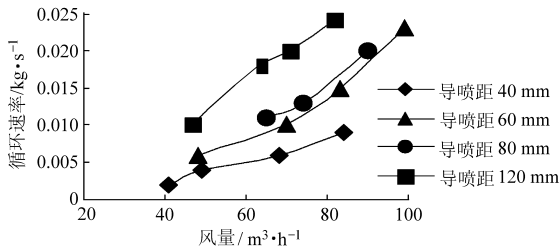


图 7 不同导喷距时固体循环速率与风量关系曲线
Fig.7 Relationship between solid circulating rate and air flow rate at different DTJD

向管受阻,致使循环量下降。导喷距太大时,旁路气流量增加阻止环隙区物料下移,喷动气流量变小也使卷吸量变小,将造成循环速率变小。

2.3.3 喷口直径

图 8 为导喷距 60 mm、物料高度 540 mm 时,30% 稻秸的混料在不同喷口直径的喷动床物料循环速率与风量的关系曲线。

分析图 8 的试验数据,两个因素在起作用:一是喷口的截面积大小决定导向管中物料有没有达到输送极限,二是没有达到导向管输送极限时喷口气体速度决定物料的卷入量。41 mm 内径的喷口,50 ~ 100 m³/h 风量范围内喷动量的变化较小。因为喷口的直径和上方导向管的直径相同,喷口截面积大,

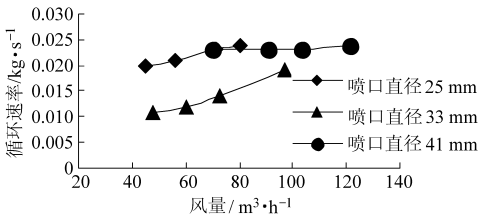


图 8 不同喷口直径时固体循环速率与风量关系曲线
Fig.8 Relationship between solid circulating rate and air flow rate at different jet size

输送物料多,达到导向管通过能力的极限,风量再大时,卷吸入导向管的物料增多,管内压降增大,迫使旁路气增加,故负反馈抑制物料的输送量显著增加。而喷口直径小时,由于喷口截面积小,相对输送物料较少,导向管内物料密度小,导向管的通过能力没有达到极限,旁路气少。故在一定风量下,小喷口的气体速度高,物料输送速度快。导向管和喷管间的气体动能大,压强能小,物料更容易进入喷口,气体卷吸物料量增加,物料输送量反而会增加。

2.4 均匀试验结果及分析

2.4.1 均匀试验结果

按照试验方法和设计方案进行试验,试验参数控制值和试验结果如表 2 所示。

表 2 均匀试验数据

Tab.2 Values of the uniform design experiments

序号	因素			试验结果		
	喷口直径 <i>A</i> /m	风量 <i>B</i> /m³ h ⁻¹	导喷距 <i>C</i> /m	循环速率 <i>W</i> /kg·s ⁻¹	单位床层高度压降 <i>p'</i> /kPa·m ⁻¹	单位功耗循环速率 <i>W'</i> /kg·(s·W) ⁻¹
1	0.033(1)	53(2)	0.04(3)	0.028	1.77	0.001 964
2	0.025(2)	92(3)	0.06(1)	0.084	9.54	0.000 654
3	0.041(3)	92(3)	0.08(2)	0.088	3.38	0.001 881
4	0.041(3)	73(1)	0.08(2)	0.059	2.32	0.002 322
5	0.025(2)	73(1)	0.04(3)	0.043	6.32	0.000 633
6	0.041(3)	53(2)	0.06(1)	0.046	1.41	0.003 910
7	0.033(1)	73(1)	0.08(2)	0.066	3.53	0.001 727
8	0.025(2)	73(1)	0.06(1)	0.066	6.28	0.000 984
9	0.025(2)	92(3)	0.04(3)	0.057	10.08	0.000 421
10	0.041(3)	53(2)	0.04(3)	0.040	1.37	0.003 545
11	0.033(1)	92(3)	0.08(2)	0.074	5.10	0.001 065
12	0.033(1)	53(2)	0.06(1)	0.040	2.04	0.002 422

注:括号中为编码值

2.4.2 试验结果的回归方程

为更好了解混合物料在 DTSB 内的喷动性能,并对其进行预测,采用 SPSS 软件对试验数据进行多元线性回归和二次多项式回归。

因变量分别选取循环速率、单位物料高度下床层压降的变化及单位有效功率的物料循环速率,自变

量为喷口直径 *A*(m)、风量 *B*(m³/h)、导喷距 *C*(m)。

物料循环速率作为因变量时,采用逐步选择变量回归法,参数进入显著性水平为 0.05,排除水平为 0.10,进行线性回归。经计算,调整决定系数 *R*² 为 0.865,方程拟合优度良好,模型显著性水平 α 小于 0.05,系数和常数项的显著性水平 α 均小于

0.05, 得到物料循环速率 W 的回归方程

$$W = 0.001B + 0.459C - 0.028$$

同样, 针对单位物料高度下床层压降, 采用变量进入法, 进入显著性水平为 0.05, 排除水平为 0.1, 经计算, 调整决定系数 R^2 为 0.918, 方程拟合优度优, 模型显著性水平 α 小于 0.05, C 的系数和常数项的显著性水平 α 均小于 0.1, 其余系数的显著性水平 α 均小于 0.01, p' 的回归方程为

$$p' = 5.22 - 218.977A + 0.124B - 42.0C$$

对单位有效功率的物料循环速率, 采用逐步选择变量回归法, 进入显著性水平为 0.05, 排除水平为 0.1。经计算, 调整决定系数 R^2 为 0.909, 方程拟合优度优, 模型显著性水平 α 小于 0.01, 常数项不显著, 其余系数的显著性水平 α 均小于 0.01, W' 回归方程为

$$W' = 0.001 + 0.11A - 0.000\,034B$$

3 结论

(1) 以稻秸粒和煤粒混合物料为原料, 在 DTSB 上进行了生物质稻秸粒与煤粒双组分物料喷动试验, 测出了不同稻秸含量的物料、不同导喷距、不同喷口直径下床层压降对表观风速的关系曲线和物料循环速率对风量的关系曲线, 为喷动床中的煤和稻秸共流动提供了基础的流体力学数据。对 DTSB 中煤和生物质共喷动的流体力学行为进行了解释。

(2) 采用拟水平法, 进行了 $U_{12}(12^3)$ 均匀设计试验, 并用 SPSS 软件对试验数据进行了多元线性回归模型的建模, 得到了物料循环速率、单位物料高度下床层压降的变化及单位有效功率的物料循环速率与喷口直径、风量和导喷距间的回归方程, 可用于预测稻秸粒煤混料在 DTSB 内喷动时的相关参数。

参 考 文 献

- 魏泉源, 王凯军, 宋英豪, 等. 中国农村生物质集中供气工程建设与管理模式[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 303 ~ 307. Wei Quanyuan, Wang Kaijun, Song Yinghao, et al. Construction and management mode of biomass centralized gas supply engineering in rural China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 303 ~ 307. (in Chinese)
- 罗惕乾, 赵杏新, 刘伟民, 等. 喷动床导向管内粗颗粒的动特性[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 138 ~ 141. Luo Tiqian, Zhao Xingxin, Liu Weimin, et al. Coarse particle flow behavior in draft tube of spouted bed[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(2): 138 ~ 141. (in Chinese)
- 刘伟民, 刘军, 张鹏程, 等. 开孔支管旋转导向管喷动床干燥油菜籽试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 228 ~ 233. Liu Weimin, Liu Jun, Zhang Pengcheng, et al. Experiment of drying rapeseed by spouted bed with a porous branch rotating draft tube[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 228 ~ 233. (in Chinese)
- 王立群, 宋旭, 周浩生, 等. 双组分颗粒系统流化特性的试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 232 ~ 236. Wang Liqun, Song Xu, Zhou Haosheng, et al. Experiment on fluidization behavior in binary mixture particle system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(3): 232 ~ 236. (in Chinese)
- Dai J J, Sokhansanj S, Grace J R, et al. Overview and some issues related to co-firing biomass and coal[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2008, 86(3): 367 ~ 386.
- Gani Asri, Morishita Keiju, Nishikawa Kunihiro, et al. Characteristics of co-combustion of low-rank coal with biomass[J]. Energy and Fuels, 2005, 19(4): 1 652 ~ 1 659.
- Shen L, Gao Y, Xiao J. Simulation of hydrogen production from biomass gasification in interconnected fluidized beds[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(2): 120 ~ 127.
- Berghel Jonas, Nilsson Lars, Renström Roger. Particle mixing and residence time when drying sawdust in a continuous spouted bed[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(8): 1 252 ~ 1 257.
- Cui Heping. Spouting of biomass particles: a review[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(10): 4 008 ~ 4 020.
- Lapuerta Magín, Hernández Juan J, Pazo Amparo, et al. Gasification and co-gasification of biomass wastes: effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions[J]. Fuel Processing Technology, 2008, 89(9): 828 ~ 837.
- 刘伟民, 张鹏程, 徐圣言. 旋转导向管喷动床干燥油菜籽的工艺优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 58 ~ 59, 73. Liu Weimin, Zhang Pengcheng, Xu Shengyan. Experimental study on drying of rapeseed in a spouted bed with rotating draft tube[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 58 ~ 59, 73. (in Chinese)