

增压导向式喷动流化床固体颗粒循环速率的关联

刘向东¹, 章名耀²

(1. 华东冶金学院冶金系, 安徽 马鞍山 243002; 2. 东南大学热能工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 实验考察了喷动气速度、流化气速度、压力以及颗粒尺寸对增压导向式喷动流化床固体颗粒循环速率的影响规律, 并归纳出关联式, 为正在开发的第二代增压流化床联合循环发电系统(2GPFBC-CC)中关键部件—炭化炉的放大设计提供了帮助。

关键词: 喷动流化床; 导向管; 颗粒循环速率; 增压; 炭化炉

中图分类号: TQ051.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2001)01-0016-04

1 前言

第一代增压流化床燃烧联合循环发电(PFBC-CC)系统因燃气初温只有 850~900°C, 整个系统效率难以有大的提高, 为此第二代增压流化床燃煤联合循环发电(2GPFBC-CC)系统设置了增压炭化炉和顶置燃烧室. 先将煤在炭化炉中热解或部分气化, 产生的焦炭或半焦在增压流化床锅炉中燃烧, 热解产物或煤气在顶置燃烧室内燃烧来加热净化后的煤气, 使燃气透平初温提高到约 1 250°C, 从而有效地提高联合循环的发电效率. 2GPFBC-CC 的系统热效率预计可由第一代 PFBC-CC 的 41% 提高到 50% 以上^[1]. 在 2GPFBC-CC 系统中, 需要解决的关键技术是增压炭化炉^[2], 炭化炉气化技术的好坏将直接影响到 2GPFBC-CC 系统的发电效率.

增压导向式喷动流化床与其它固定床或流化床气化炉相比有其独特的优越性^[3], 因而被东南大学确定为增压炭化炉的型式. 研究表明, 颗粒循环速率是预测喷动流化床流动行为的一个至关重要的变量, 由于缺乏颗粒循环速率的实验数据, 使得喷动流化床反应器的设计不能成功地实现放大, 为此作者在增压导向式喷动流化床中对颗粒循环速率作了大量的实验研究, 以考察各种操作参数对颗粒循环速率的影响规律, 为完成增压炭化炉的研制奠定了基础.

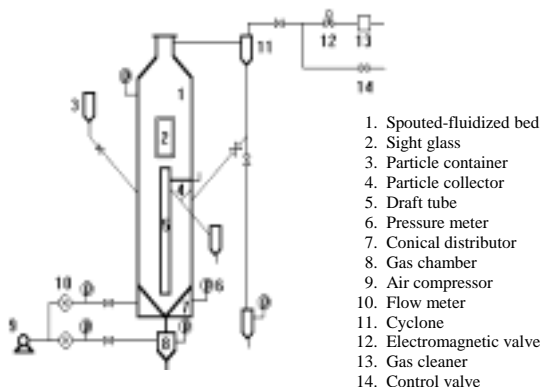


图1 实验装置系统图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

2 实验装置和床料

实验装置如图1所示, 床本体为圆柱形钢制结构, 高 3.5 m, 筒体内径 0.2 m, 导向管内径 0.042 m, 长 1 m, 喷动管内径 0.025 m, 导向管与喷动管之间的距离为 0.063 m, 自由空域高 2.5 m. 布风板采用倒锥形、直孔式, 锥角为 60°, 开孔率 1%, 在床体上设有循环颗粒取样口.

实验用压缩空气作为气体介质. 由于增

收稿日期: 1999-11-22, 修回日期: 2000-02-01

基金项目: 国家“八五”与“九五”重点攻关项目(编号: 85-205-02-07)

作者简介: 刘向东(1971-), 男, 安徽省芜湖市人, 工学硕士, 洁净煤燃烧与气化专业.

压炭化炉中的床料是煤颗粒，因此实验床料采用密度与煤接近的聚苯乙烯树脂颗粒，其真实密度为 $1\ 042\ \text{kg/m}^3$ ，堆积密度为 $606\ \text{kg/m}^3$ ，球形系数为 1.0。床料的流动性指数为 89，流动性良好，是一种较为理想的床料。实验颗粒的平均粒径为 1.2 和 1.7 mm，床料总重为 10 kg。

实验时，喷动气从喷动管输入，流化气由布风板输入，在这两股气体的作用下，床料先经过导向管而形成喷泉，喷泉中的颗粒再回落至周围的环形区，由此在床内形成喷动循环运动。所谓固体颗粒循环速率是指单位时间内通过单位导向管截面积上的固体颗粒的质量。本实验中，颗粒循环速率的测量结合了网兜法和外循环法的特点，利用取样器收集从喷泉中回落的颗粒。

对不带导向管和流化气的传统喷动床，用 Lefroy^[4]的公式计算得到最大可喷动床高为 0.67 m，而本实验体系的床高为 0.64 m，床层高径比为 3.2，并带有导向管，故实验体系可以达到稳定的连续的喷动状态。实验中喷动气速度为 11.2~48.9 m/s，流化气表观速度为 0~0.191 m/s，压力为 $(1\sim 6)\times 10^5\ \text{Pa}$ ，测量均在完全喷动的情况下进行。实验体系的最小喷动速度见表 1。

表 1 最小喷动速度
Table 1 Minimal spouting velocity

$P (\times 10^5\ \text{Pa})$	$u_f (\text{m/s})$	$u_{ms} (\text{m/s})$	$P (\times 10^5\ \text{Pa})$	$u_f (\text{m/s})$	$u_{ms} (\text{m/s})$	$P (\times 10^5\ \text{Pa})$	$u_f (\text{m/s})$	$u_{ms} (\text{m/s})$
1	0	17.8	3	0	15.2	6	0	9.2
1	0.117	15.1	3	0.039	12.8	6	0.020	7.7
1	0.191	13.2	3	0.064	11.3	6	0.032	7.0

实验中，每次取样开始时打开取样口上的挡板，连续取样 10 s，取样结束时关闭挡板。取样质量小于 200 g，占床料总质量的 2% 以下，不影响床的正常操作。每个工况下取样 3~5 次，并取其平均值。

3 实验结果及分析

3.1 喷动气速度的影响

喷动气速度是导向式喷动流化床中最为重要的一个参数，它是使颗粒产生喷动的主要动力来源，没有喷动气将无法使颗粒产生喷动，因此它对颗粒循环速率的影响是决定性的。图 2 是喷动气速度对颗粒循环速率影响的典型曲线，颗粒循环速率随喷动气速度的增加呈现出先增大后减小的趋势，这与 Muir^[5]的研究结果一致。

在小喷动气速度下，喷动气射流的直径小于导向管内径，加大喷动气速度后，喷动气射流的能量增加，射流卷吸颗粒的能力加大，携带的颗粒量增多，故颗粒循环速率增加。同时喷动气射流的直径也在增加，当射流直径等于导向管内径时，颗粒循环速率达到最大，此时继续加大喷动气速度，喷动气射流的直径将大于导向管内径，使处于射流外边界上的浓相颗粒群逐渐移向导向管外，使得进入导向管的颗粒数量逐渐减少，造成颗粒循环速率的下降。

3.2 流化气速度的影响

流化气是导向式喷动流化床中的一股辅助气体，它同喷动气一样显著地影响颗粒的循环

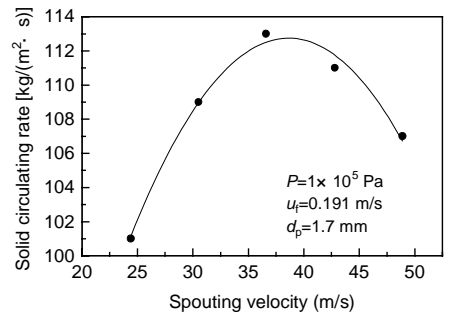


图 2 喷动气对颗粒循环速率的影响
Fig.2 The effect of spouting velocity on solid circulating rate

速率. 如图 3 所示, 当 $Q_f/Q_s > 0$ 时, $F_o/F > 1.0$, 说明加入流化气后颗粒循环速率比不加流化气时要大, 另外, 当 Q_f/Q_s 相同且流化气增加时, F_o/F 也增加, 换言之, 若喷动气速度相同, 则流化气的增加使颗粒循环速率增加. 这有两方面的原因: 一方面, 流化气加入后, 由于流化气的旁路作用使部分流化气携带环形区的一些颗粒进入喷动气射流中, 并随喷动气射流进入导向管, 这样, 导向管中的颗粒量增多, 因此颗粒循环速率增加; 另一方面, 流化气能在一定程度上抑制喷动气的旁路, 改善环形区的气固混合, 使喷动气射流的卷吸能力增强, 导致颗粒循环速率增加. 基于同样的原因, 流化气的加入使最小喷动速度减小, 如表 1 所示.

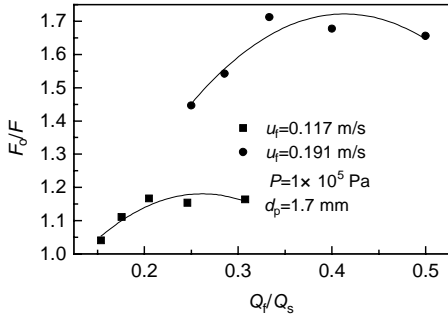


图 3 流化气对颗粒循环速率的影响

Fig.3 Effect of fluidizing velocity on solid circulating rate

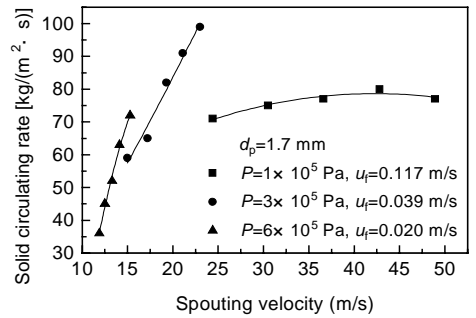


图 4 压力对颗粒循环速率的影响

Fig.4 Effect of pressure on solid circulating rate

3.3 气体压力的影响

气体压力的变化从本质上说是气体密度的变化, 压力的改变也将使颗粒循环速率发生变化, 如图 4 所示, 当喷动气速度相同时颗粒循环速率随压力的增加而增加. 这是因为当喷动气速度相同时, 气体压力的增高使气体密度增大, 喷动气射流的能量增加, 射流的卷吸能力增强, 从而颗粒循环速率增加. 另外, 当 $P=1 \times 10^5$ Pa, $u_s=42.8$ m/s 时, 颗粒循环速率达到最大, 此时射流直径等于导向管内径, 此后继续增加喷动气速度将导致颗粒循环速率的下降, 而当 $P=3 \times 10^5$ Pa 时, 实验中喷动气速度的范围为 15.0~23.0 m/s, 当 $P=6 \times 10^5$ Pa 时, 喷动气速度范围为 11.9~15.3 m/s, 在此速度范围内射流直径仍小于导向管内径, 故此时颗粒循环速率随喷动气速度的增加而增加, 不出现减小的趋势.

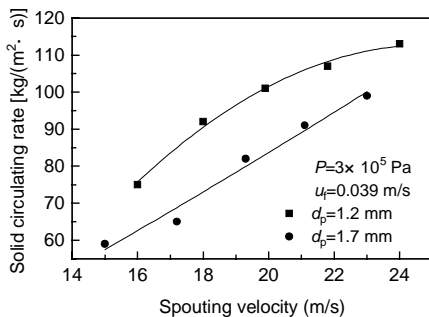


图 5 平均粒径对颗粒循环速率的影响

Fig.5 The effect of mean particle diameter on solid circulating rate

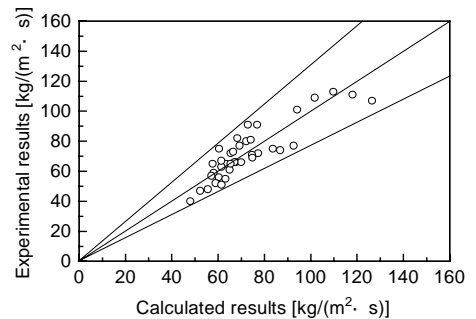


图 6 颗粒循环速率计算值与实测值的比较

Fig.6 Comparison of calculated and experimental results for solid circulating rate

3.4 颗粒平均粒径的影响

除了喷动气速度、流化气速度和压力等操作参数对颗粒循环速率有影响外，物料的物理参数对颗粒循环速率也有影响，颗粒的平均粒径就是其中之一。如图 5 所示，在相同的喷动气速度、流化气速度和压力下，粒径大的颗粒循环速率较小。究其原因，在于相同的气体速度和压力下，喷动气射流卷吸小粒径颗粒的能力大，卷吸大粒径颗粒的能力小，即将大粒径颗粒卷吸起来所需要的能量要比卷吸小粒径颗粒所需的能量大，这样，在相同的喷动气速度和压力下，大粒径颗粒的循环速率比小粒径颗粒的循环速率小。

另外，不同流化气速度和压力的情况下粒径对颗粒循环速率的影响趋势基本相同。

4 实验关联式的建立

将有效实验数据进行回归分析，对平均粒径为 1.7 mm 的颗粒，得到如下形式的关联式：

$$\frac{F_O}{\rho_s \sqrt{D_c g}} = 3.774 \times 10^{-8} Re^{0.87} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0.537} \left(1 + \frac{Q_f}{Q_s} \right)^{1.685} \quad \left(Re = \frac{\rho_f Q_s E}{900\pi \mu_f D_i^2} \right).$$

为检验该式的可靠性，对颗粒循环速率的计算值和实测值进行了比较，如图 6 所示。该关联式的计算值与实测值之间的最大偏差为 20.5%。

5 结论

- (1) 喷动气射流对颗粒的卷吸能力是影响颗粒循环速率的本质原因。
- (2) 在相同的喷动气速度下，流化气和气体压力的增加都使颗粒循环速率增加。
- (3) 在其它条件相同的情况下，大粒径颗粒的循环速率比小粒径颗粒小。

符号表：

d_p 颗粒平均粒径 (mm)	P 床内气体压力 (Pa)	u_{ms} 最小喷动速度 (m/s)
D_c 床体直径 (mm)	Q_f 流化气体积流量 (m ³ /h)	u_s 喷动气速度 (m/s)
D_i 喷动管内径 (mm)	Q_s 喷动气体积流量 (m ³ /h)	ρ_f 气体密度 (kg/m ³)
F 不带流化气时颗粒循环速率 [kg/(m ² ·s)]	Re 喷动气雷诺数	ρ_s 颗粒真实密度 (kg/m ³)
F_O 带流化气时颗粒循环速率 [kg/(m ² ·s)]	u_f 流化气表观速度 (m/s)	μ_f 气体动力粘度 [kg/(m·s)]
g 重力加速度 (m/s ²)		

参考文献：

- [1] 黎强，邱宽嵘，丁玉．流态化原理及其应用 [M]．北京：中国矿业大学出版社，1994. 230–231．
- [2] 毛健雄．煤的清洁燃烧 [M]．北京：科学出版社，1998. 386–387．
- [3] Watkinson. Comprison of Coal Gasification in Fluidized and Spouted Beds [J]. Can. J. Chem. Eng., 1983, 61(3): 468–475．
- [4] 《化学工程手册》编辑委员会．化学工程手册·流态化 [M]．北京：化学工业出版社，1987. 180．
- [5] Muir J R, Behie L A, Berruti F .Solids Circulation in a Spout–Fluid Bed with Draft Tube [J]. Can. J. Chem. Eng., 1988, (6): 919

Solid Circulating Rate in a Spouted–fluidized Bed with Draft Tube at Elevated Pressure

LIU Xiang-dong¹, ZHANG Ming-yao²

(1. Dept. Metal., East China Institute of Metallurgy, Maanshan, Anhui 243002, China;
2. Inst. Thermal Energy Eng, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The effects of operating factors, such as spouting velocity, fluidizing velocity, pressure and particle size on solid circulating rate in a spouted–fluidized bed with draft tube were investigated. The experimental results showed that the spouting velocity was the most important factor. The solid circulating rate increased with increasing fluidizing velocity and pressure, and decreased with increasing mean particle diameter. Based on the experimental results, an empirical correlation of the solid circulating rate was established. This work is helpful to designing the carbide furnace in the second generation PFBC–CC system.

Key words: spouted–fluidized bed; draft tube; solid circulating rate; elevated pressure; carbide furnace