

# 双室内循环流化床煤气化系统的冷态实验研究

栗志 许国良 钱壬章

(华中理工大学动力系工程热物理教研室)

〔摘要〕 本文发展并建立了双室并列流化床煤气化系统的冷态模型,在此基础上,对影响气化系统操作的两个主要因素——两流化床之间颗粒物料的循环技术及流化床床层的膨胀特性进行了实验研究,得出了不同操作条件下,两床间物料循环及流化床床层膨胀的特性,分析讨论了各种因素(流化速度、床层静止高度、辅助气流量等)对气化系统操作的影响。

关键词 双室流化床 煤气化 床层膨胀 颗粒循环

分类号 TK229.66 TK411.14

## 1 引言

在我国的矿物燃料资源中,煤炭的贮量占有绝对优势,合理利用煤炭资源和研究开发新的煤炭转化技术具有重要的现实意义。通过对煤的转化制得的煤气使用方便,对环境造成的污染小,因此,煤的气化技术一直是研究的重点。

传统的煤气化发生装置多属于固定床(移动床)系统,这种工艺方法最大的缺点是需要采用优质块煤作气化原料,且处理量受限。与固定床相比,流化床型的气化系统具有对煤种适应性强,操作和控制更容易,结构更简单,处理量大,对环境造成的污染小等特点。单床层流化床煤气化炉早在本世纪20年代就已成功地投入商业应用<sup>[1]</sup>。在近期开发研究的煤气化工艺系统中,流化床炉型占了很大的比例<sup>[2]</sup>。目前,国外开发研究的基本上都属于第二代煤气化技术<sup>[3]</sup>。

本文提出煤气化过程的工艺方案并建立其模型,通过实验,研究各种因素对气化系统操作过程的影响,为后期热态实验提供操作依据。

## 2 双室并列流化床煤气化炉的冷态模型

煤的气化包括煤的燃烧和气化两个过程。流化床型的煤气化系统中,煤的燃烧和气化过程大多是在同一个流化床中完成的,因而煤燃烧所产生的烟气不可避免地要掺混到煤气中,使煤气质量下降。由于流化床特别适合于多床系统操作,可以方便地在各个反应段之间传递固体颗粒,利用这一特点,采用多个流化床可将煤的燃烧和气化分开来进行,通过高温固体颗粒在两床间的循环来传递热量,避免了烟气与煤气的掺混,这样制得的煤气中不含有氮气,使煤气的质量大大得到

收稿日期 1995-06-27

本文联系人 栗志 男 1963年生 博士生 430074 武汉

改善。国外开发研究的  $\text{CO}_2$  接受体法、Battele 法、Hy-gas 法等气化工工艺均采用了两个或更多的流化床。我国北京科技大学开发研究的分区流态化气化系统<sup>[4]</sup>,也采用了多个流化床,但该方法未能很好地解决烟气与煤气的掺混问题。清华大学开发研究的流化循环床双器煤气化工艺<sup>[4]</sup>,将其中一个流化床作为干馏器,干馏后的煤送至另一个流化床进行气化,据介绍可制得中等热值煤气。在此基础上,参考国外有关的煤气化系统工艺,我们提出了一种新型的双室并列流化床煤气发生系统,已建立了中试规模(煤处理量为 20kg/h)的热态装置,目前已完成了冷态试验。本方案的主要工艺原理是:煤的气化系统由两个流化床组成,一个用于煤的燃烧,一个用于煤的气化,气化介质采用水蒸气,其工艺示意图如图 1 所示。

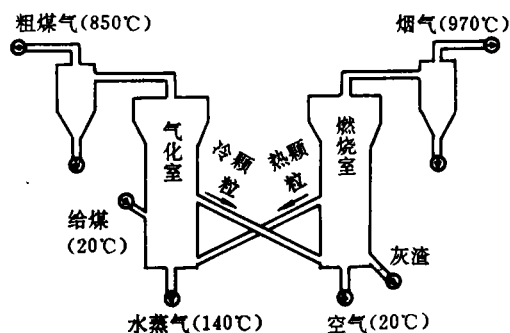


图 1 并列流化床煤气化系统工艺示意图

粉煤从料仓中由螺旋给料机送入气化室,在气化室中升温干馏,并与通入的水蒸气发生气化反应产生煤气,气化反应后的碳颗粒通过气化室溢流口,经过一立管和 L 型阀送至燃烧室进行燃烧,燃烧产生的热量由床层中的惰性颗粒石英砂经燃烧室溢流口、另一立管和 L 型阀送至气化室,以保证气化所需之热量。系统工作时,两个流化床(燃烧室和气化室)均保持流化状态,通入气化室的水

蒸气兼作流化介质,燃烧室以空气作流化介质,操作压力为常压,灰渣由燃烧室底部排出,控制燃烧室的温度在  $970^\circ\text{C}$  左右,气化室温度在  $850^\circ\text{C}$  左右。

气化炉的本体结构简图如图 2 所示,由燃烧室、气化室、两个回料立管构成,在燃烧室和气化室中各分别设置了一溢流口和一回料口,用两个立管分别将一室的溢流口和另一室回料口相连接构成 L 阀,作为两室颗粒循环的通道。在两立管底部分别引入控制颗粒循环量的辅助气流,气化炉顶部采用了一倒锥形结构,可以有效地减少颗粒的夹带,气化炉的布风板采用了风帽结构。

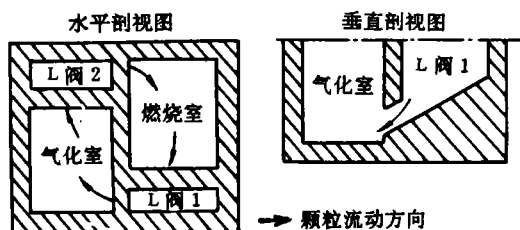


图 2 气化炉本体结构

本工艺方法与 Battle 方法的主要差别在于:(1)气化炉的结构更为简单紧凑,床层反应段的截面积保持不变;而 Battle 气化炉因截面积的变化而使炉体内部在工作时分为三个流化区,这使操作参数难以掌握。(2)本方案只需考虑从气化室给煤和从燃烧室排渣,而不必由双室都给煤和排渣。(3)在固体颗粒循环方面,本方案采用了内循环通道结构,不但减小了热损失,与采用外循环通道的气化系统相比,大大减小了设备的外形尺寸,颗粒在两床间的循环量采取单参数控制,即在一定操作工况下,仅由引入 L 阀立管底部的辅助气流量的大小来控制。

本系统正常运行的关键在于:两床间颗粒的循环能否正常运行,这主要涉及到流化床床层的膨胀特性,颗粒在循环通道中的运动特性及辅助气流的引入对颗粒循环的影

响,以上问题还不能从理论上得到解决,目前只能通过实验来探索其规律。

### 3 流化床床层的膨胀特性曲线

本系统中两流化床上部均设有溢流口,操作时必须使流化床床层的膨胀高度大于溢流口的高度,以保证颗粒在两床间的循环。流化床床层的膨胀与床中出现的气泡的性质密切相关,如气泡尺寸、气泡频率、气泡速度等。按照流化床的两相理论:当流化床中的操作速度大于临界流化速度时,过量的气体将以气泡的形式通过床层。按此理论可估算床层的膨胀高度,但实际上在估算床层膨胀高度时,要涉及到气泡的长大、破裂、合并等过程,理论上很难处理,因而床层的膨胀高度大多以实验为依据来确定。本文不拟对床层的膨胀机理进行理论探讨,此处仅给出实验结果。

我们在前述的冷态模型上分别对燃烧室和气化室进行了床层膨胀实验。燃烧室流化床的横截面积为 200×180 mm,气化室流化床的横截面积为 120×180 mm,流化介质均为空气,床料为石英砂,其平均粒径为 0.493 mm,床层的膨胀高度直接由流化床顶部进行测量,不同静止床层高度  $H_s$  下的床层膨胀特性如图 3、图 4 所示。

实验中观察到,床层膨胀初期较为均匀,并且有一明显的上界面。随着气流速度的增加,床层的膨胀表现出极大的不均匀性,床层上界面不明显,且波动很激烈,属于典型的聚式流化。显然,床层的膨胀程度主要取决于操作车速,在一定操作速度范围内,车速越高,则床层的膨胀程度越大。

### 4 颗粒密相循环技术的实验研究

本工艺系统能否正常运转,涉及到的问

题较多,包括物料的流化工况,床料在两床间的循环、辅助气流量的大小及其相互之间的匹配等。以上因素中,最为关键的技术就是物料在两床间的循环。通过理论分析,我们得到了颗粒循环量随辅助气流量变化的计算关系式及颗粒最大、最小循环量的表达式,确定了 L 阀的操作范围,其操作范围为<sup>(6)</sup>:

$$Q_{min} = kA(P_1 - P_2) / L_v \quad (1)$$

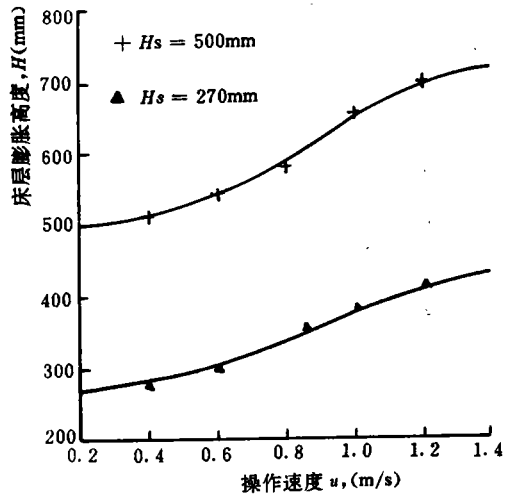


图 3 燃烧室床层膨胀特性

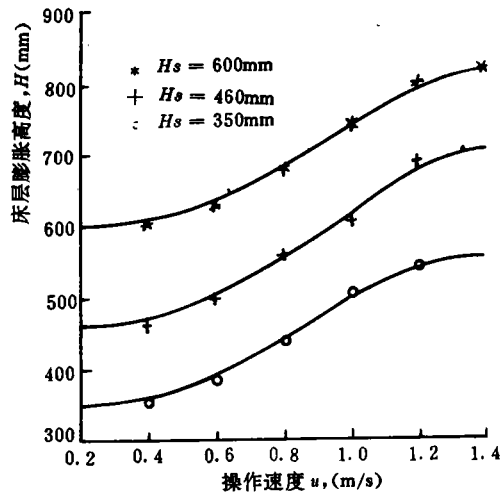


图 4 气化室床层膨胀特性

$$Q_{\max} = k[(1 - \varepsilon_m)\rho_s g L_v - (P_1 - P_2)] / (L_h + U_{mf}) A \quad (2)$$

$$k = [\varepsilon_m^3 (\varphi_s d_p)^2] / [154 U_i (1 - \varepsilon_m)] \quad (3)$$

$Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  分别为所需辅助气流量的最小和最大值;  $P_1$ ,  $P_2$  分别为 L 阀两端的压力;  $\varepsilon_m$  为立管中床层的空隙率;  $\rho_s$  为固体颗粒的真实密度;  $L_v$ ,  $L_h$  分别为 L 阀立管段和水平段的长度;  $A$  为 L 阀的横截面积。以上过程的理论推导可参阅文献<sup>[5]</sup>。两床间固体颗粒的密相循环受到许多因素的影响,为此,我们在冷态模型上进行了大量的实验。实验表明,本工艺系统的正常运行是可以实现的。

#### 4.1 实验装置及实验方法

冷态实验采用的流化床系统与前述相同,整个系统的实验段由透明有机玻璃制成,以便于观察固体颗粒在流化床内及循环线路中的流动情况。实验在常温常压下进行,颗粒物料为石英砂,其密度为  $2749 \text{ kg/m}^3$ ,空隙率为  $\varepsilon_{mf} = 0.4$ ,实验中分别采用了平均粒径为  $d_p = 0.58 \text{ mm}$  和  $d_p = 1.1 \text{ mm}$  的两种砂子,颗粒循环量的测定采用粒子示踪法。实验时,保持立管中的料柱为最高料封状态。在流化床及 L 阀立管段的不同高度处布置了一系列测压孔,用于测量循环线路中压力分布。

#### 4.2 实验结果及分析

对平均粒径分别为  $d_p = 0.58 \text{ mm}$  和  $d_p = 1.1 \text{ mm}$  的两种砂子在不同的流化速度下进行了实验,所得结果如图 5 所示。通过对实验结果的分析,我们可以得到以下结论:

4.2.1 在一定工况条件,颗粒的循环量随辅助气流量的增加而呈指数关系增加,没有辅助气流时,固体颗粒的循环不能发生,这说明采用辅助气流来控制颗粒的循环量是可行的。

4.2.2 在整体上颗粒的循环量随流化床中操作气速的增加而增加,这是因为操作气速增加,使床层底部压力降低,导致了 L 阀水平段驱动颗粒运动的压差增加,从而使颗粒的

循环量增大。

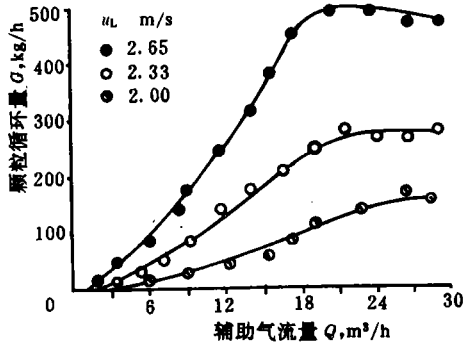
4.2.3 当辅助气流的流量小于一定数值时,无论床层处于什么样的操作气速,均没有颗粒的循环发生,这主要是因为辅助气流量小时,所对应的 L 阀水平段的驱动力不足以克服水平段中的摩擦阻力,因而没有颗粒的循环发生。在辅助气流量增加到使颗粒循环发生的初级阶段,颗粒循环量因流化速度不同而造成的差异较小。但当辅助气流量较大时,从图 5 可见,由于流化速度的不同,可以造成颗粒循环量之间成倍的差异。在辅助气流量达到一定的数值后,颗粒的循环量不再随辅助气流量的增加而增加,这是因为 L 阀立管底部压力随辅助气流量的增加而增加,当此压力增大到一定数值使立管中的物料处于临界流化状态后,立管中的颗粒处于悬浮状态,此时,辅助气流量增加,多余的气体以气泡的形式通过立管,立管底部的压力不再增加,所以颗粒的循环量也不再增加。

4.2.4 比较图 5(a) 和 (c) 或 (b) 和 (d) 可以看出:对于较小的流化床静止床高,在相同的辅助气流量和相同的流化操作速度下,系统具有更大的颗粒循环量。这是由于在相同的流化操作速度下,较小的静止床高,其底部的压力也较小,这样造成了较大的颗粒循环驱动力,因而导致了颗粒循环量的增加。

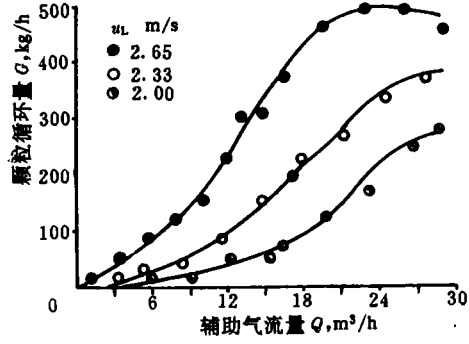
4.2.5 我们在热态实验台架上进行的初步热平衡实验表明,两床之间的热量传递通过颗粒循环来实现是可行的,在一床的温度用高温烟气加热到  $400^\circ\text{C}$ ,另一床温度保持为室温时,在开启 L 阀循环装置约一分钟的时间内,两床的温度即达到平衡为  $160^\circ\text{C}$ 。

## 5 结论

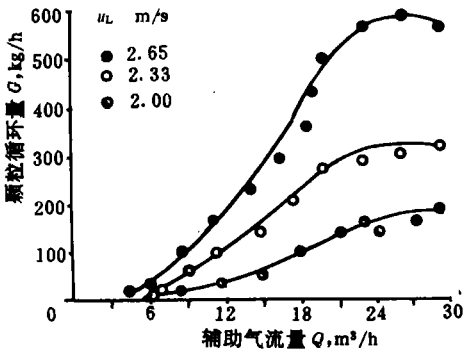
1 本系统可以处理粉煤和劣质煤,工艺简单,结构紧凑、新颖。



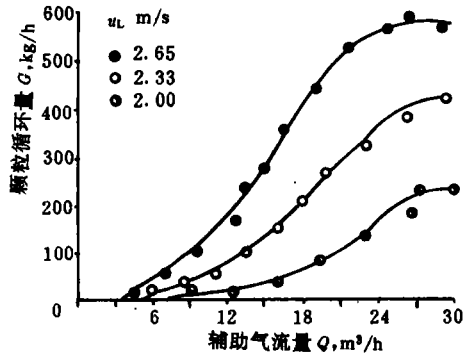
(a)  $H_s = 235 \text{ mm}, d_p = 1.1 \text{ mm}$



(b)  $H_s = 235 \text{ mm}, d_p = 0.58 \text{ mm}$



(c)  $H_s = 285 \text{ mm}, d_p = 1.1 \text{ mm}$



(d)  $H_s = 285 \text{ mm}, d_p = 0.58 \text{ mm}$

图5 颗粒循环量的实验曲线

2 得到了不同工况下颗粒循环量与辅助气流量之间的定量关系。用辅助气流量大小来控制颗粒循环量是可行的,并具有一定调节范围。

3 两床之间的热量传递可以通过颗粒的循环来实现。分析讨论了影响颗粒循环量的因素。

4 得到了床层膨胀的特性曲线,为气化系统的运行提供了操作依据,本文的工作为后期热态实验打下了良好基础。

### 参考文献

- 1 Daizo Kunii. Fluidization Engineering. Butterworth-Heinemann, 1991
- 2 M A 埃利奥特. 煤利用化学(下册). 北京: 化学工业出版社, 1991
- 3 陈贤仁. 煤炭气化新工艺. 北京: 煤炭工业出版社, 1984
- 4 尹锡勋. 应用粉煤制备燃料煤气方法的探讨. 动力工程, 1990, 10(5)
- 5 许国良. 并列流化床煤气化炉的研制及其流动与传热. 华中理工大学博士论文, 1994

(渠源 编辑)

PFBC联合循环中燃气轮机的变工况性能=The Off-design Performance of a Gas Turbine in a PFBC Combined Cycle [刊,中]/Zhao Shihang, Xu Fusheng(Tsinghua University), Chen Xiaoping (Southeastern University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):65~69

With a pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC) serving as an example set up was a mathematical model for the off-design performance calculation of a pressurized fluidized bed boiler and gas turbine system. In addition, an analysis was conducted of the off-design performance of the gas turbine in the PFBC system. **Key words:** pressurized fluidized bed, PFB boiler, gas turbine, off-design performance

双室内循环流化床煤气化系统的冷态实验研究=A Cold-state Experimental Study on a Gasifier with Two Fluidized Beds [刊,中]/Li Zhi, Xu Guoliang, Qian Renzhang(Huazhong University of Science & Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):70~74

This paper describes the setting-up of a cold-state model of a gasifier with two fluidized beds. An experimental study was performed of the two major factors affecting the operation of the gasifier, i. e. particle circulation technique between the two beds and fluidized bed expansion characteristics. As a result, obtained were the characteristics of the particle circulation between the two beds and the fluidized bed expansion under different operating conditions. Also analyzed were the various factors which influence the gasifier operation, such as fluidization speed, bed static height, auxiliary gas flow rate, etc. **Key words:** twin fluidized bed, coal gasification, bed expansion, particle circulation

MPS磨新型静动叶结合组合式旋转煤粉分离器=A Study on a New Type of Pulverized Coal Classifier with Static Flaps and Rotating Blades for a MPS Mill [刊/中]/Kong Wenjun, Luan Qingfu, Zhang Minchun, Cheng Shangmo, Han Caiyuan (Huazhong University of Science & Technology), He Jishan, Yan Peihong (Bei Jing Electrical Power Equipment General Works)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):75~80

Described in this paper is a new concept for designing a rotary type pulverized coal classifier, featuring the combination of static flaps and rotating blades. Model tests of the classifier with different mounting directions of static and rotary blades have been completed. The test results justify the design principle adopted, thus providing a theoretical basis for the development of a new type of classifier, **Key words:** pulverized coal preparation, rotary type classifier, static flaps and rotating blades, pulverized coal fineness

稳燃腔煤粉燃烧器对不同煤种燃烧稳定性的研究=A Study of the Combustion Stability of Pulverized Coal Burners with a Combustion stabilization Cavity When Firing Various Kinds of Coals [刊/中]/Chen Gang, Qiu Jihua, Zhang Zhiguo, Li Fujin, Sun Xuexin (Huazhong University of Science & Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):81~84

With the help of a three-dimensional particle dynamic analyzer a measurement was performed of the return flow zone flow field of a pulverized coal burner equipped with a combustion stabilization cavity and a comparison was made of the return flow zone characteristics at various locations of a bluff body. The authors practice has shown that through an adjustment of the location of the bluff body and the change of some structural dimensions of the abovesited burner it is possible to achieve a significant improvement of the combustion stability when burning various kinds of coals. **Key words:** boiler, pulverized coal burner with a combustion stabilization cavity, coal property variation

高浓度水煤浆流动的滑移现象及其管内流动特性的影响=The Slip Phenomenon of Coal Water Mixture