

# 循环流化床中气固两相流动特性的可视化研究

田子平, 钟志强, 陈永国, 陈俊

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 在自行设计并搭建的试验台上, 利用 CCD 的图像快速采集功能, 获得了不同气速下流化床内的流态图像, 并用图像处理的方法对这些原始图像进行了有效的处理。研究了贴壁回探流、气体局部扩散系数、局部空隙率随横向位置和高度分布、气泡的上升速度, 给出了实验中气泡边界曲线的分维数。实现了循环流化床内气固两相流体动力学特性的可视化, 为图像处理技术应用到循环流化床作了有益的尝试。

**关键词:** 循环流化床; 锅炉; 气固两相流; 流体动力学; 图像处理; 可视化研究

中图分类号: O357.5 文献标识码: A

## 1 前言

用图像处理的方法对循环流化床中的气固两相流动进行可视化研究, 在化工、冶金行业已取得一定成果<sup>[1~2,9]</sup>。但锅炉行业所用的循环流化床因其宽筛分固体颗粒及配风方式、炉膛结构的特点, 使得其气固两相流体动力学特性另有值得研究之处<sup>[3,5,10]</sup>。

循环流化床中气固两相流体动力学特性对于床料(包括煤粒)的混合, 煤粒的燃烧, 气相与固相间的质交换, 床料的夹带与扬析以及对受热面管的传热等均有极大的影响, 而且, 气固两相流体动力学特性是合理设计循环流化床锅炉的基础。因此, 对其进行深入了解是非常有意义的。

本文通过图像处理, 对循环流化床中的气固两相流动进行实验研究及理论分析, 其目的是探索用一些新方法研究流态化, 通过循环流化床内气固两相流体动力学特性的可视化, 为图像处理技术应用到循环流化床作了有益的尝试。

## 2 实验台系统和实验过程简介

实验台系统由循环流化床试验台、罗茨风机、管道、流量压力测量装置、图像采集装置和辅助系统几部分组成。试验台主体是用透明的有机玻璃材料制成, 便于图像采集。用树脂作为试验床料, 循环运行模拟循环流化床的颗粒运动。流化床本体内尺寸为矩形 200 mm × 50 mm, 从布风板到上升段顶部为 1 200 mm, 侧边壁从上至下每 50 mm 有一小孔, 共有 10 孔, 外接橡皮管至压差测量系统。颗粒经上升段时由压差测量装置和 CCD 摄像机了解其中气固两相流动的变化。颗粒经上升段后通过外置分离器的分离, 又被回送到流化床底部, 完成循环运动。试验用不透明的塑料颗粒, 形状近似球型, 其筛分比如表 1 所示。

表 1 颗粒的筛分比示例

粒径/mm	0.455	0.455~0.56	0.56~0.63	0.63~0.82	0.82~0.9
筛分比/%	8	11	42	27	12

实验是对不同流量下流化床内颗粒和气泡流动特性进行研究, 采用了五种一次风流量, 分别为 (25 °C、25 kPa) 18 m<sup>3</sup>/h, 24 m<sup>3</sup>/h, 40 m<sup>3</sup>/h, 60 m<sup>3</sup>/h, 68 m<sup>3</sup>/h, 比较了它们在同一高度下的流动状况, 实验主要是在鼓泡床, 湍流床, 快速床阶段。此外, 还着重分析了逆流返混和贴壁效应。

实验压力数据的采集主要是针对不同流量下不同高度处风压的变化。

实验中采集到的图像是在不同流量、不同高度和不同横向位置处拍摄的, 而且所拍摄的图像都是连续拍摄的十五帧, 通过计算机来捕捉图像, 从中选出有价值的图像信息。此外还重点采集了贴壁流图像, 气泡相图像。整个实验台系统如图 1 所示。

收稿日期: 2002-09-02

作者简介: 田子平(1942-), 男, 江苏镇江人, 上海交通大学教授, 博士生导师。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

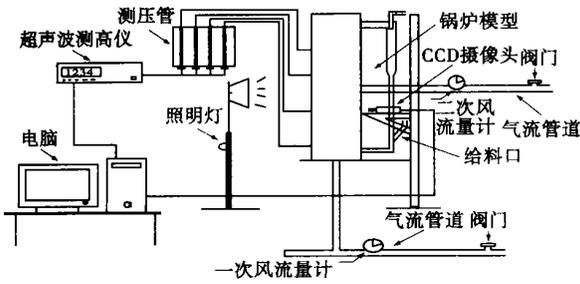


图 1 冷态循环流化床实验系统图

### 3 实验结果分析

#### 3.1 鼓泡态

在鼓泡态可以看出密相区和稀相区有一个清晰的分界面(如图 2 所示)。

对不同高度, 不同横向位置流动图像的分析, 主要还是分析图像的灰度分布, 进而可以归纳出流化床的颗粒分布和气泡分布。图 3 是实验图像及处理

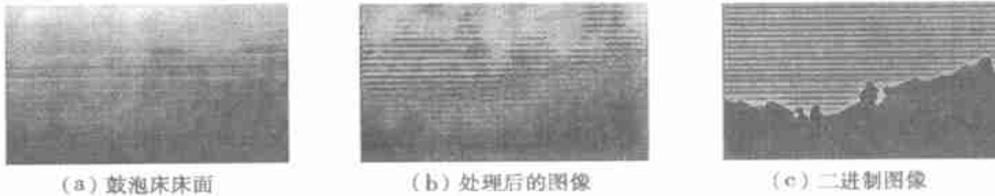


图 2 鼓泡态图像

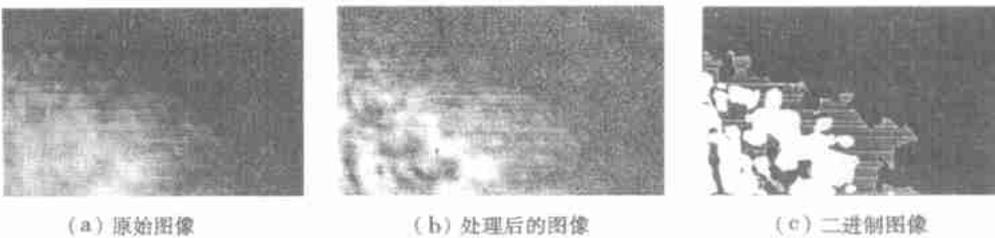


图 3 颗粒分布和气泡分布

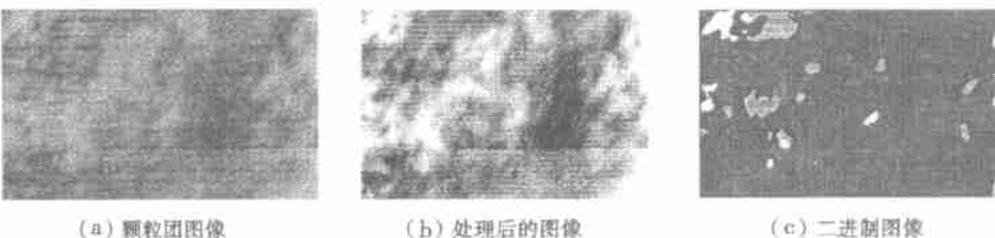


图 4 颗粒团图像

后的灰度图像和二进制图像(距布风板 185 mm)举例。

从不同横向位置, 不同高度处图像的灰度分布可以看出, 中心处灰度较高, 也就是说颗粒浓度较低, 空隙率较大, 越往两侧, 灰度越低, 浓度增加, 空隙率减小, 两边基本上呈对称分布。这可能是由于中心处形成气泡的几率较大, 而边壁则存在颗粒的逆流返混现象, 因而会形成这样的灰度分布。另外还可以看出, 随着高度的增加, 灰度值也在增加, 这是由于流化床的底部主要是密相区, 颗粒聚集较集中, 而上部基本上是稀相区, 气泡相占主导地位。

此外, 我们还可以从经图像处理过的二进制图像中计算出局部空隙率, 进而可总结出局部空隙率随横向位置和高度分布的分布。分析得出, 中心区空隙率较大, 越往两边, 空隙率越小, 这与平均灰度的分布一致。这也是由于中心区气泡形成的几率较大, 而边壁有颗粒下降流存在。另外随着高度的增加, 空隙率也会增加, 这是因为鼓泡态存在明显的下部密相区和上部稀相区。

#### 3.2 湍流态

继续增大流量, 当空气流量达到  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 床面波动加剧, 密相区与稀相区界限变得越来越不明显, 这正反映了在鼓泡态向湍流态转变过程中床内压力脉动的加强。同时还可以观察到粒子成团(如图 4 所示)和物料返混现象。

湍流床流化图像灰度随横向位置和高度变化规律与鼓泡态相似。局部空隙率随横向位置和高度分布的情况也同鼓泡态相似, 中心区空隙率较大, 两侧空隙率较小。随着高度的增加, 空隙率也在增加。有一点不同的是空隙率在横向上的变化趋缓, 这个

现象在床顶部尤为明显。这是由于湍流态时，颗粒和气体混合得更加充分，颗粒相和气体相都呈连续分布。

### 3.3 快速流化床

当流量达到  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ，流化床处于快速床状态，颗粒开始循环起来，小颗粒在主床中被夹带出去，经过旋风分离器分离落到返料腿中，进而又回到主床中。此状态下床内的流动状态如图 5 所示。

分析流量为  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  时流态化图像平均灰度随横向位置和高度变化可以看出，中心区及  $x/L$  为  $\pm 0.5$  处区域平均灰度较高，两者的区别不大，到了壁面区，平均灰度会有所下降。这是因为存在边壁下降流的缘故，壁面处颗粒聚集较多，中心区由于流化得比较均匀，气体相的比例在增加。局部空隙率随横向位置和高度分布情况：中心区空隙率较大，两侧空隙率较小。随着高度的增加，空隙率也在增加。空隙率在横向上的变化慢慢趋缓，这个现象在床内稀相区尤为明显。这是由于快速态时，颗粒团会在边壁聚集，因而会降低边壁的空隙率。若高度增加，边壁聚集的颗粒会减少，空隙率反而会上升。中心区由于有大量的上行气流，所以空隙率会加大，且随着高度的增加，颗粒相在减少，空隙率又会提高。

### 3.4 贴壁流



图 5 快速流化床流态图像

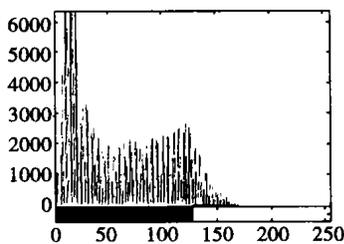
与中心区气固两相垂直向上流动不同，在壁面处气固呈反向流动，如图 6 所示。壁面处颗粒团浓度大，与中心处的浓度差会产生粒子的径向迁移和波动卷吸。这种类似于空气对流的现象，我们可以用气泡的行为来解释：由于气泡在床的径向截面上的分布



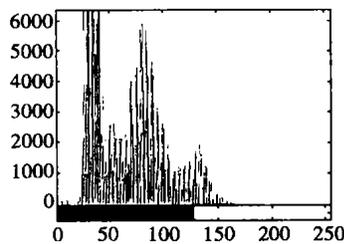
(a) 贴壁流图像 (b) 处理后的图像

图 6 贴壁流图像

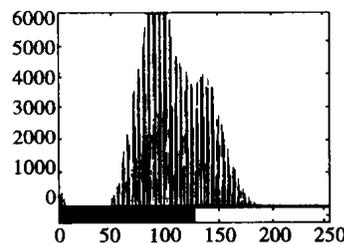
是不均匀的，气泡主要分布于床中心与壁面之间的区域，一方面，气泡在上升途中，上部要将颗粒顶开，



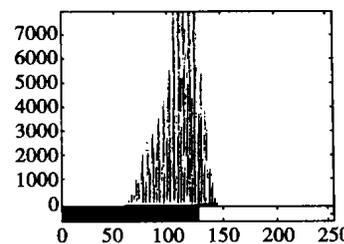
(a)  $18 \text{ m}^3/\text{h}$  灰度直方图



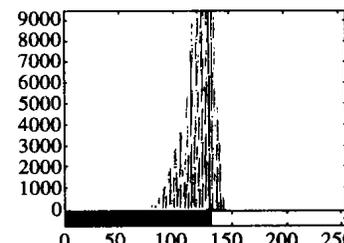
(b)  $24 \text{ m}^3/\text{h}$  灰度直方图



(c)  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  灰度直方图



(d)  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  灰度直方图



(e)  $68 \text{ m}^3/\text{h}$  灰度直方图

图 7 不同流量灰度直方图

而下部又卷吸上来一部分颗粒；另一方面，气泡在床面上破裂时，会将一部分颗粒抛上去，但这些颗粒又会陆续沉降下来形成贴壁流，贴壁流束头部粒子又会被气泡剥离而进入核心区形成床内循环，由此可见床内颗粒的运动主要是受气泡的诱发作用而形成局部以至整体的循环流动。

### 3.5 不同流量同一位置图像的分析

本次实验还拍摄了一组不同流量同一位置的图像。把图像灰度作为特征参量，图 7 给出了它们的灰度直方图。横坐标为灰度级别  $0 \sim 255$ ，共 256 级。纵坐标为各灰度级别像素点个数。从灰度直方图可以看出，随着流量的增加，图形向灰度大的方向迁移，也就是说亮度在加大，这是因为气泡相比例在扩大，颗粒相在减小。

表 2 给出了由这组图像近似计算得出的局部空隙率。由表 2 可知，局部空隙率也在逐渐加大，这同上面的灰度直方图分析结果一致。

### 3.6 气泡形状和尺寸

当床层比处于其中的气泡大得多时以及气泡远离壁面而且气泡的间距很大时, 气泡基本为球形, 但其底部有些凹。所以小气泡一般为圆球形, 较大的气泡由于受到其它气泡、壁面和周围颗粒的干扰, 气泡形状发生畸变, 呈椭圆形, 更大的则为扁平状。另外, 二维气泡的形状与对应的三维气泡是不同的。二维气泡很难呈圆形, 而呈椭圆形, 同时其垂直方向的长轴常常是短轴的两倍。从图 8 也能清晰的看到气泡的形状。



图 8 气泡图像

在二维气泡中, 尾迹所占的体积分数非常小, 可能接近于零, 这与颗粒间的假粘滞力有关。而且在二维床中, 气泡运动的阻力大部分来自壁效应。气泡的尺寸人们习惯用相等体积的圆球直径  $d$  来表示。最初的气泡尺寸取决于分布板的型式, 气泡大部分是在分布板附近长大, 气泡的尺寸均随流速和床层高度增加而增加。我们对气泡的上升速度做了计算, 得出气泡当量直径  $d$  为 4.615 mm, 上升速度为 13.61 cm/s。

表 2 不同流量同一位置处的局部空隙率

流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	局部空隙率
18	0.454
24	0.538
40	0.768
60	0.845
68	0.934

### 3.7 气体扩散

气体行为中还有一个十分重要的方面就是气体扩散。气体扩散包括轴向扩散和横向扩散。轴向扩散的一个重要现象就是气体返混, 它主要是由于颗粒下降流引起的。

本文从图像的角度可近似计算出气体局部扩散系数, 通过对连续采集来的图像进行必要的处理后, 转化为二进制图像, 再计算出前后两幅图像的气体覆盖面积, 两者之差为迁移量。然后迁移量除以

采样间隔即为气体局部扩散系数, 但这样计算出来的扩散系数是针对某一个点或某一个区域, 且它的扩散方向也很难确定。

表 3 不同流量下的局部扩散系数

流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	局部扩散系数 / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
18	1.322
24	0.551
40	0.136
60	0.116
68	0.09

表 3 列出了本文计算出来的不同流量下的同一位置处的局部扩散系数。从表中可以看出, 局部扩散系数随着流量的增大而减小, 这是因为随着流量的增加, 颗粒驻留时间会减少, 这直接导

致了扩散系数的减小。

### 3.8 气泡的分形特性

本文作者通过对采集来的气泡图像进行必要的处理以后, 即可求出所需的曲线长度和覆盖面积。这里长度和面积采用像素为单位, 根据图像特征, 计算分维数, 最后计算得出的气泡边界曲线的分维数如表 4 所示。从表中可以看出气泡边界曲线的分维数大致维持在 1.5 左右。

表 4 气泡边界曲线的分维数

图像编号	分维数
111	1.5262
112	1.5174
113	1.5319

## 4 分析和讨论

通过图像处理手段和传统测量方法, 定性和定量地分析了流化床内气固两相流的流体动力特性。在图像处理过程中采用了去除背景光和噪声, 中值滤波, 调整对比度等方法, 最终使图像得到增强, 变得容易辨识。通过把原来的 RGB 图像变成二进制图像, 近似计算出局部空隙率。本文通过上述的图像处理过程对流化床的鼓泡态, 湍流态, 快速态三种

流态特征以及贴壁流作了有关的图像分析,最后总结出它们各自的规律。此外,本文还着重从图像角度分析了气体的行为特征,如形状和尺寸,上升速度,局部扩散系数,气泡边界曲线的分形特征。

#### 4.1 流体动力特性

鼓泡态密相区和稀相区有明显的分层界面。从鼓泡态的流化图像中可以看出,中心处平均灰度较高,越往两侧,灰度越低。横向上局部空隙率也是中间高两边低,这是由于中心处形成气泡的几率较大,而边壁则存在颗粒的逆流返混现象的缘故。随着高度的增加,平均灰度和局部空隙率也在升高,这是因为鼓泡态存在明显的下部密相区和上部稀相区。

湍流态时,密相区与稀相区界限变得越来越不明显,存在粒子成团和物料返混现象。无论是气体相还是固体相都是连续的。平均灰度和局部空隙率变化规律与鼓泡态相似,有一点不同的是横向上局部空隙率变化趋缓,这个现象在床顶部尤为明显。

快速流化态时,稀相区和飞溅区的比例加大,而密相区所占比例减小。床面高度也在加大,颗粒的夹带更加剧烈。平均灰度和局部空隙率也是中间较高两边较低,但两者区别已经减小,这个现象在床内稀相区普遍存在,这是因为快速态时,边壁下降流的厚度明显减小。当流量进一步加大,轴向局部空隙率差别也在缩小。

流化床内存在边壁下降流。贴壁流生成的条件,除了要有足够大的回料量和流化速度,以保证具有足够高的动能外,壁面附近气体的低流速区的存在是形成贴壁流的重要条件。贴壁流发源于主床床顶的物料层,它的延伸长度与回料量和操作速度以及上升气流有关。核心区与贴壁流之间强烈的传质过程主要是头部粒子被剥离的过程,被剥离的粒子进入核心区后随气流上升,直至床顶又进入贴壁流。

同一位置处,流量越大,局部空隙率越大,灰度直方图向亮处迁移。

#### 4.2 气泡行为特征

二维气泡的形状呈椭圆形。

通过图像处理的方法,计算出二进制图像中气泡的当量直径,最后可近似得到气泡的上升速度,计

算了当量直径为 4.615 mm 小气泡的上升速度为 13.61 cm/s。

气体扩散包括轴向扩散和横向扩散。轴向扩散一个重要现象是气体返混,它常发生在环形区,气体返混系数大小跟表观气速,颗粒循环流率有关,主要取决于颗粒浓度的大小。横向气体扩散系数主要受表观气速,颗粒循环率,二次风,流化区域的影响。本文计算了不同流量下同一位置处局部扩散系数,得出局部扩散系数随流量加大逐渐减小。

在分析气泡边界曲线的性质时,首次引入了分形的概念。并用周长—表面积法计算了气泡边界曲线的分维数,得出它的分维值大致为 1.5 左右。

总之,将图像处理技术和分形理论运用到流化床流态转变和气泡行为的研究上,为流化床理论研究工作提供了一条新的思路。

#### 参考文献:

- [1] SIMONS S J R. Imaging techniques for fluidized bed systems; a review [J]. *The Chemical Engineering Journal*, 1995, 56: 83—93.
- [2] LACKERMEIER U, RUDNICK C, WERTHER J, *et al.* Visualization of flow structures in a circulating fluidized bed by means of laser sheet and image processing [J]. *Powder technology*, 2001, 114: 71—83.
- [3] ZHANG W N, JOHNSON F. Momentum probe and sampling probe for measurement of particulate flow properties in CFB boilers [J]. *Chem Eng Sci*, 1997, 52: 497—509.
- [4] LIN YUNG-CHUNG, LEU LI-PING. Voidage profiles in magnetically fluidized beds [J]. *Powder Technology*, 2001, 120: 203—204.
- [5] 安恩科,徐通模.循环流化床锅炉边壁下降流的生成机理 [J]. *动力工程*, 1997, 17(6): 69—72.
- [6] JOHAN STERNEUS, FILIP JOHNSON, BO LECKNER. Gas mixing in circulating fluidized-bed risers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55: 129—148.
- [7] WON NAMKUNG, SANG DONE KIM. Gas backmixing in a circulating fluidized beds [J]. *Powder Technology*, 1998, 99: 70—78.
- [8] WON NAMKUNG, SANG DONE KIM. Radial gas mixing in a circulating fluidized beds [J]. *Powder Technology*, 2000, 113: 23—29.
- [9] BRAM A, SAADEVANDI, RICHARD TURTON. The application of computer-based imaging to the measurements of particle velocity and voidage profiles in a fluidized bed [J]. *Powder Technology*, 1998, 98: 183—189.
- [10] 光昕,牛长山,顾亚平,等.循环流化床中贴壁回探流的机理试验研究 [J]. *热能动力工程*, 1998, 13(3): 178—182.

(渠 源 编 辑)

先进微型燃气轮机的特点与应用前景 = **Specific Features of Advanced Micro Gas Turbines and Their Application Prospects** [刊, 汉] / WENG Yi-wu, SU Ming, WENG Shi-lie (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 111—115

A new type of heat engines, advanced micro gas turbines pertain to a category of clean, high-efficiency, low-cost and highly reliable energy supply system. They have attracted considerable attention from academics and witnessed to date a spectacular development. Concerning the worldwide research and development efforts as well as the current usage situation of these turbines, the authors have focused on their technical advances and features. Furthermore, an exploratory study was carried out of a small-sized distributed energy system with a micro gas turbine serving as its core and also of a hybrid gas turbine / fuel cell system. The usage prospects of micro gas turbines in China have been briefly evaluated. **Key words:** micro gas turbine, distributed power generation, cogeneration of cooling energy, process heat and electric power, fuel cell

无电晕高温静电除尘技术的最新进展 = **Recent Advances in the Technology of Non-corona High-temperature Electrostatic Precipitation** [刊, 汉] / YANG Ya-ping, WEI Qi-dong (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), HUANG Hui-fen (Department of Electronics Engineering, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 116—119

The technology of non-corona high-temperature electrostatic precipitation involves an innovative method of dust particle removal suited for use at elevated temperatures. It utilizes the cathode emission of thermal electrons to get the dust particles in flue gases electrically charged. The electrically charged particles are then captured and collected under the action of an electric field. The most recent results of research of the above-cited technology are presented in detail. **Key words:** non-corona electrostatic precipitation, performance test, cathode poisoning

循环流化床中气固两相流动特性的可视化研究 = **A Visual Study of the Gas-solid Dual-phase Flow Characteristics in a Circulating Fluidized Bed** [刊, 汉] / TIAN Zi-ping, ZHONG Zhi-qiang, CHEN Yong-guo, CHEN Jun (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 120—124

Through the use of a charge-coupled device's function of fast image acquisition on a self-designed and built test rig obtained were the images of flow conditions in a fluidized bed under different airflow rates, followed by an effective processing of these initial images by using an image processing method. Furthermore, a series of phenomena were studied, including the turn-down flow adhered on a wall, gas local-diffusion coefficient, the profile of local voidage along the longitudinal and transverse axis, and the ascending velocity of bubbles. Also given is the fractal dimension of the boundary curve of bubbles during tests. As a result of the above, realized was the visualization of gas-solid dual-phase hydrodynamic characteristics in a circulating fluidized bed, thus fulfilling a fruitful attempt to use image processing techniques on a circulating fluidized bed. **Key words:** circulating fluidized bed, boiler, gas-solid two-phase flow, hydrodynamics, image processing, visual study

不同煤种燃烧生成多环芳烃的研究 = **A Study of the PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) Emissions Resulting from the Combustion of Different Ranks of Coal** [刊, 汉] / LI Xiao-dong, FU Gang, YOU Xiao-fang, YAN Jian-hua (National Key Lab of the Ministry of Education on Clean Utilization of Energy Sources and Environmental Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 125—127