

# X射线投影成像法测量气固流化床中的固含分布

## —(II)应用及误差分析

张志攀, 罗国华, 魏飞, 汪展文

(清华大学化工系, 北京 100084)

**摘要:**通过标准化实验对X射线投影成像系统的误差进行了分析,进而应用该测量系统对提升管、纳米颗粒聚团床、鼓泡床和大直径下行床入口区的固含分布进行了测量,结果说明本测量方法可较准确、无接触测量气固两相流体系的固含分布。

**关键词:**X光成像;流化床;固含分布

中图分类号:TQ026.7;O434.19 文献标识码:A 文章编号:1009-606X(2003)02-0097-06

## 1 前言

前文<sup>[1]</sup>在轴对称假设条件下,将X光投影成像系统用于测量气固流化床固含分布,使用新型X光探测器和改进后的回归算法对投射图像进行重构还原,得到流化床中径向颗粒浓度分布。前文着重于测量原理的介绍,本文将该测量方法应用于不同的流化床体系,给出了初步的误差分析,并得到了一系列固含分布曲线。

## 2 误差分析

X射线成像法的测量误差引入是多方面的。首先是光强测量中引入的误差,包括投射流化床和标样X射线的光强测量误差,如几何失真和亮度失真、本底噪音、X光散射和界面效应等。这部分误差称作测量误差,它最终影响实测质量厚度曲线的准确程度;还有一部分误差称作计算误差,它在重构计算中引入,其中包括几何条件、边界条件、重构算法等。误差也有可能来自于X光源的光斑过大(2 mm)而引起的投影模糊或X光的散射。计算误差影响从质量厚度计算固含分布的准确程度。

以上这些误差很难全部定量化描述,本文用标准化实验来综合考察这些误差的总体影响,实验测量对象是图1所示的填满FCC的柱状环隙盒(紧堆,假设空间均布)。

图1比较了固含的实际分布与测量结果。从测量结果可以看出,固含分布有三个区间:区间A为环隙的内空腔,区间B为内床壁,区间C是紧堆的FCC床层。测量结果在区间B、C与已知分布吻合得很好,而在区间A则有较明显的误差。通过环面积分还可以得到平均固含:

$$\bar{\alpha} = \frac{2}{(R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} r\alpha(r)dr, \quad (1)$$

环面积分反映了实际的固含平均值,测量值与实际固含的平均值误差小于5%,说明测量结果与实际值吻合较好。

收稿日期:2002-09-09, 修回日期:2002-12-27

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(编号:29725613)

作者简介:张志攀(1977-),男,四川省成都市人,硕士研究生,化学工程专业;罗国华,通讯联系人, E-mail: luoguohe@flotu.org.

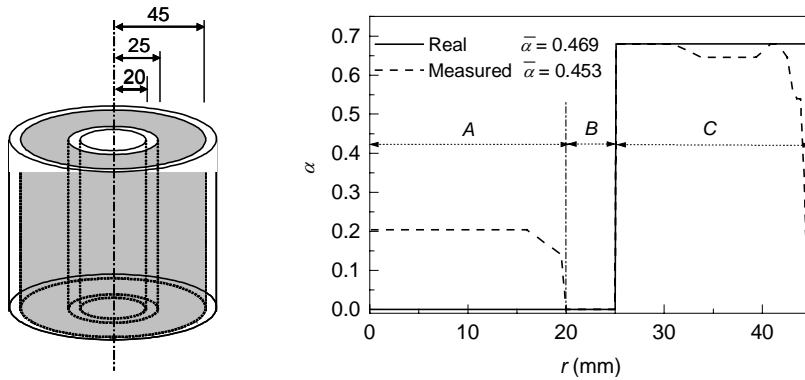


图 1 标准样品的测量  
Fig.1 Measurement of a standard sample

### 3 对气固两相流体系的测量

基于以上测量，可以认为 X 光成像法能够以一定的精度反映流化床内的固含分布情况. 将该测量方法应用在不同的气固两相流体系中，可以考察该方法的适用范围.

#### 3.1 提升管内的 FCC 浓度分布

在一般操作条件下，提升管床层对 X 光的吸收较为适中，床径大小也较为适中；对提升管的测量反映了在普通条件下该测量方法的精确度. 提升管装置的设备参数见文献[2].

图 2 是在距离提升管入口 1 m 和 4 m 处，测量得到的测量截面附近不同静压差(代表不同颗粒循环量)条件下的固含径向分布.

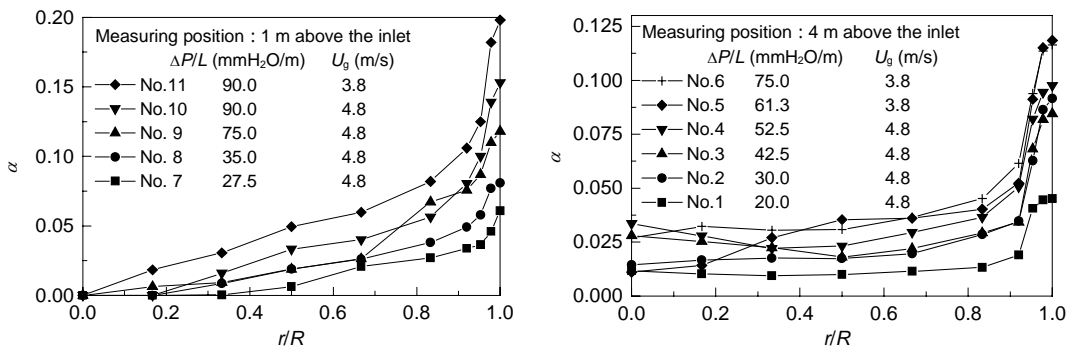


图 2 不同条件下提升管内的固含径向分布  
Fig.2 The measured radial distributions of solid concentration in a riser under different conditions

图 2 结果说明，离提升管入口 1 m 与 4 m 处的固含径向分布特征有所不同，4 m 处管中心稀与边壁浓的两相特征非常明显，1 m 处的固含径向分布呈现连续变化趋势，测量结果代表了提升管中颗粒加速段与发展段的典型固含分布.

实验还通过压差法<sup>[3]</sup>测量了截面平均固含，图 3 将两种方法得到的平均固含进行了比较. 图中绝大部分实验点落在 20% 误差线内，可见用 X 光成像法测量得到的截面平均固含值，与压力法得到的数值基本吻合，但 X 光成像法的优势是可实时获得局部固含的时均信息.

### 3.2 纳米颗粒聚团床中碳纳米管(CNTs)聚团颗粒浓度分布

黑色粉末状的碳纳米管(CNTs)对 X 光吸收很弱,对纳米颗粒聚团床中碳纳米管聚团颗粒分布测量亮度范围窄,所以亮度分辨率低,误差也就会较大.这组测量结果反映了在 X 光低吸收率的条件下,X 光成像法的准确程度.

实验使用内径 35 mm、床高 160 mm 的玻璃管壁流化床,其分布板为烧结玻璃板.流化颗粒为本研究组大批量制备的多壁 CNTs 颗粒<sup>[4]</sup>,参数见表 1.

表 1 碳纳米管聚团颗粒参数  
Table 1 Particle parameters of CNTs

Mean diameter of particles ( $\mu\text{m}$ )	Density at densely packed bed ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
35.5	197.5

实验在如表 2 所示的 4 个典型操作条件下稳定流化 5 min.

表 2 纳米颗粒聚团床操作条件  
Table 2 Operating conditions of a nano-agglomerate fluidized bed

	No.1	No.2	No.3	No.4
Gas velocity (m/s)	0	0.0115	0.0433	0.144
Bed state visualized	Fixed bed	Fluidized	Slight elutriation	Heavy elutriation

在分布板上方 15 mm 截面处测量得到的径向固含分布如图 4(a)所示.图中纵坐标是相对固含,其中 $\alpha$ 是紧堆固含值.从图中可以看出,由于静止床层没有压实,所以固含略低于紧堆固含,并均匀分布;随着气速增加,平均固含下降,同时固含分布在边壁出现高浓区.

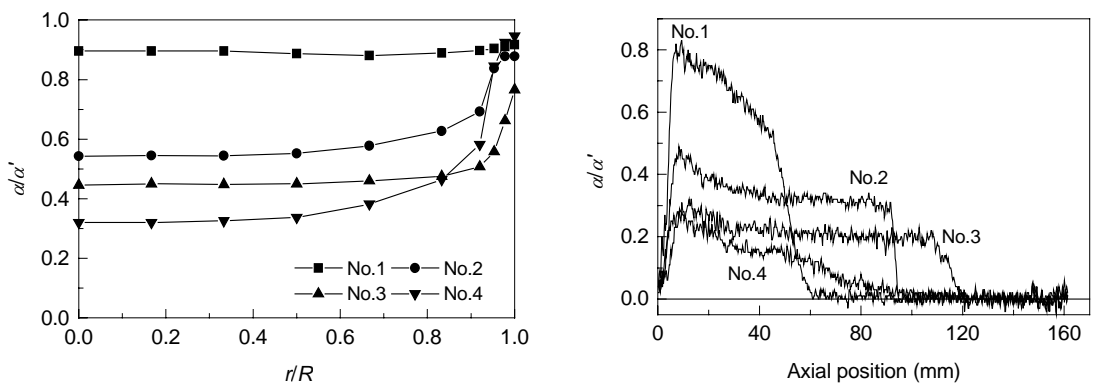


图 4 不同条件下纳米颗粒聚团床的相对固含径向分布和轴向分布

Fig.4 The radial and axial distributions of solid concentration in a nano-agglomerate fluidized bed of CNT particles under different conditions (measured after 5 min of fluidization)

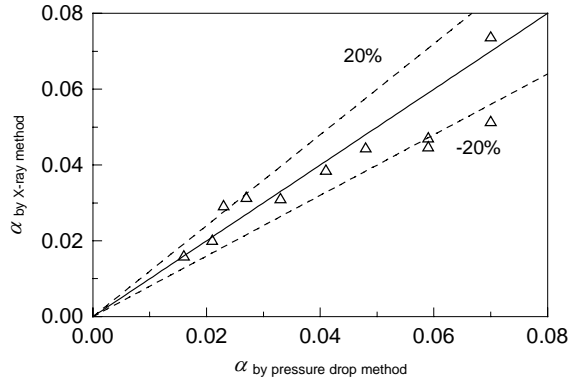


图 3 X 射线法得到的截面平均固含与压差法比较  
Fig.3 Comparison of the measured  $\bar{\alpha}$  with the pressure drop method

通过计算不同轴向位置的截面平均固含可以得到固含的轴向分布. 测量得到不同条件下截面平均固含的轴向分布如图4(b)所示. 图中每条分布曲线的峰面积可以反映床内的颗粒总量(表3). 从表中可以看出, 随着气速的增加峰面积下降, 颗粒带出量也不断增大. No.4 条件下颗粒有 60% 被气体带出, 图 4 中对应轴向固含分布曲线的阶梯形状不明显, 床层界面消失, 已接近循环床的操作状态.

表 3 床内颗粒藏量(峰面积)  
Table 3 Holdup of particles in the bed (peak area)

	No.1	No.2	No.3	No.4
Gas velocity (m/s)	0	0.0115	0.0433	0.144
Peak area	32.68	31.15	24.29	13.04
Percentage of elutriated particles (%)	0	5	26	60

### 3.3 鼓泡床中硅粉浓度分布

相对于以上两个体系, 鼓泡床内的硅粉颗粒对 X 光的吸收较强, 探测器接收到的光强较弱. 对该体系的测量反映了 X 光成像法在 X 光高吸收率条件下的精确度.

实验设备为内径 112 mm 的鼓泡床, 流化颗粒为硅粉颗粒. 表 4 给出了所用硅粉颗粒性质和鼓泡床的操作条件.

表 4 硅粉颗粒性质和鼓泡床的操作条件  
Table 4 Silicon particle parameters and bed operation conditions

Particle property	Particle dimension ( $\mu\text{m}$ )	Density at dense packing ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Particle density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Solid concentration at dense packing
	250~400	1160	2328	0.498
Operation condition	Static bed height (mm)	Gas flowrate ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Superficial gas velocity (m/s)	Fluidized bed height (mm)
	350	10	0.918	500

由于床径较大, 标样盒的厚度范围要想覆盖全部测量范围, 就要做得很厚, 导致标样曲线严重失真, 以至于回归出的固含值超过紧堆固含. 所以本研究特别为这种高浓情况设计了圆柱形标样盒, 它是与流化床相同管径的圆管, 管内填满颗粒. 由于流化床与标样盒内颗粒浓度差不多, 所以标样的亮度范围能够覆盖流化床的全部亮度范围. 标样方法的改变将带来一部分计算方法的变化, 由于篇幅限制, 这里不详细描述.

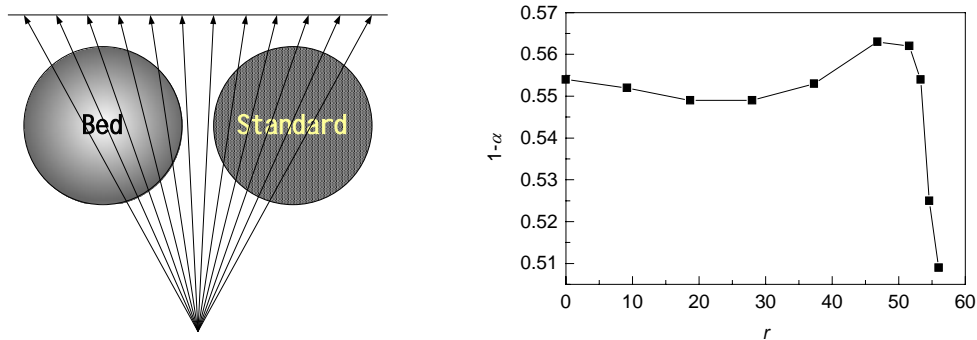


图 5 圆柱形标样和空隙率径向分布

Fig.5 Column standard and radial voidage distribution

图 5 是测量得到的空隙率的径向分布,与经典抛物线分布有较大差异.其平均空隙率为 0.55,与用床层高度计算得到的平均值 0.65 相差很大.测量结果不令人满意,原因可能是在高浓度的床层内散射现象加剧和改进算法中相近数值相除带来的误差.

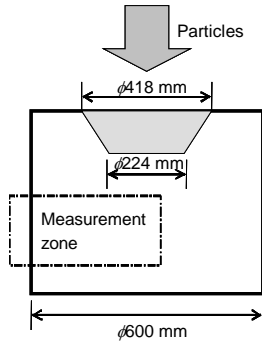


图 6 下行床入口结构  
Fig.6 The inlet structure of a downer

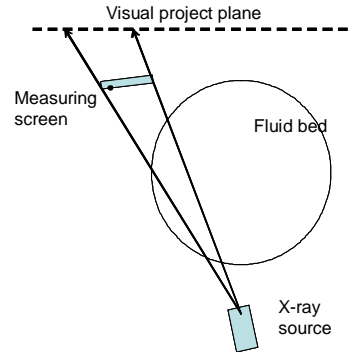


图 7 拼图的投影原理  
Fig.7 Project principle of X-ray pictures

### 3.4 $\phi 600$ mm 下行床入口的 FCC 浓度分布

以上测量对象都是床径 $<200$  mm 的流化床.对于大型设备,由于探测屏面积较小,无法一次获取足够的信息,需要多次拍摄,由此带来处理数据上的困难.大直径的下行床入口的测量,提供了一次扩展 X 光成像法应用范围的机会.

固含测量在本研究室高 18 m 的下行床入口段(内径 600 mm)进行,入口结构为圆台状漏斗,颗粒从漏斗上方的料腿进入下行床.图 6 给出了实验拍摄区域,实际测量时一共拍摄了 7 组图像.将 7 幅图像拼接成为一幅全景图,用于重构处理.拼图使用投影原理(图 7),测量时记录每次拍摄时探测器的位置,然后将探测屏在不同位置上得到的每一个像素点都投影到虚拟投影平面上去,即得到全景图.

将得到的全景图进行重构还原,得到的径向固含分布为双峰分布(图 8).在床中央的峰可能是直接从入口上方旋风料腿落下的颗粒群.在 75 mm 处的峰是沿入口斜面滑落的颗粒群,峰位置与入口半径 110 mm 相吻合;径向 100 mm 以外的空间固含则相当低,应该是弥散颗粒.此结果说明本测量系统也可用于无接触检测工业级大直径流化床局部颗粒浓度.

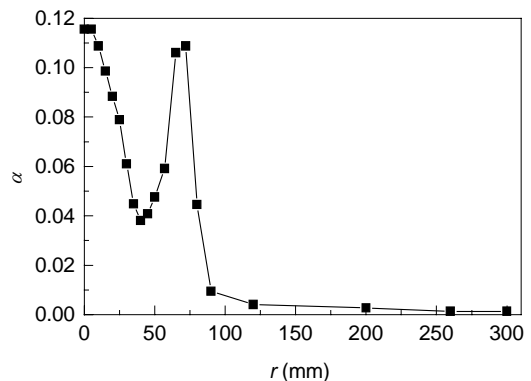


图 8 下行床入口的径向固含分布  
Fig.8 Radial distribution of solid concentration at the inlet of a large scale downer

## 4 结论

采用自主开发的 X 射线投影成像系统可无接触、较准确地测量提升管、纳米颗粒聚团床、以及下行床等气固两相流体系的轴径向固含的时均分布(分钟级),对高浓度鼓泡床的测量结果会产生较大偏差.通过对标准样品的测量分析可以认为本方法测量得到的平均固含误差 $<5\%$ ,局部固含误差 $<20\%$ .

## 参考文献：

- [1] 张志攀, 刘会娥, 罗国华, 等. X 射线投影成像法测量气固流化床中的固含分布—(I) 原理及图像处理方法 [J]. 过程工程学报, 2002, 2(5): 400–405.
- [2] 刘会娥, 杨艳辉, 魏飞, 等. 提升管-下行床耦合反应器内颗粒混合行为 [J]. 化工学报, 2002, 53(3): 302–306.
- [3] 金涌, 祝京旭, 汪展文, 等. 流态化工程原理 [M]. 北京, 清华大学出版社, 2001. 106–214.
- [4] 李志飞, 罗国华, 魏飞, 等. 纳米聚团床法制备碳纳米管的生长机理 [J]. 过程工程学报, 2002, 2(3): 224–229.

## Portable X-ray Photography of Solid Concentration in Gas–Solids Fluidized Beds — (II) Application and Deviation Analysis

ZHANG Zhi-pan, LUO Guo-hua, WEI Fei, WANG Zhan-wen

*(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

**Abstract:** This paper is focused on the application of the portable X-ray photography technique to measurement of the radial and axial profiles of solid concentration in a gas–solids riser, a pilot-plant-scale downer, and a nano-agglomerate fluidized bed of carbon nanotubes. Twenty to thirty images with 100~200 ns X-ray pulses were processed to get a time-averaged concentration profile. Results show that this technique is a promising non-intrusive method to get time-averaged solid concentration profiles in gas–solids two phase flow systems.

**Key words:** X-ray; fluidized bed; solid concentration