

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

张志攀, 刘会娥, 罗国华, 汪展文, 魏飞

(清华大学化工系, 北京 100084)

摘要: X光成像和CT在医疗、工业等领域获得了广泛的应用。本文在轴对称假设的条件下, 将X光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。

关键词: X光成像; 流化床; 固含分布; 图像处理

中图分类号: TQ026.7; O434.19 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2002)05-0400-06

1 前言

颗粒浓度分布是气固两相体系的重要性质, 准确的颗粒浓度分布规律对涉及气固两相体系(比如石油催化裂化过程)新型反应器的研究与开发有着十分重要的意义。前人有关颗粒浓度的数据大都使用反射式光纤法得到, 光纤法的优点是可以得到局部测量值, 缺点是探头对测量点附近的流场有干扰, 降低了测量准确度。

辐射投影成像技术是利用X射线、 γ 射线等具有较强穿透能力的电磁波透射被拍摄对象, 射线被不同物质吸收的程度不同, 通过检测出射射线的强度可以获得被拍摄对象内部的信息。辐射投影成像技术在医学临床应用中已经十分成熟和广泛, 经过多年实践和经验积累, X光成像及CT(Computer tomography)成像等技术已经相当成熟。

国外也有不少研究者将这一技术应用到流化床的测量中。Azzi等^[1]用 γ 射线测量重构了循环流化床中提升管的截面固含分布。Kantzas等^[2]直接使用医用CT对流化床和固定床进行扫描, 得到径向断层的空隙率分布。Banholzer等^[3]直接使用医用CT得到流化床轴向断层的时均图像。但以上技术存在不同程度的缺点: γ 射线实验只能实现单点测量, 无法同时获得面源信息, 要想获得多处实验数据必须增加实验次数, 并且 γ 射线危险性大。而直接使用医学X光CT设备昂贵, 设备移动和安装也不方便, 而且对大型设备的测量很困难。

在轴对称的假设下, 只需要拍摄一幅投影, 采用简化算法, 可以重构还原出流化床内颗粒的轴径向分布。Shollenberger等^[4]使用 γ 射线, 在简化条件下用Abel算法重构了鼓泡床中的轴径向气含分布。Weinstein^[5]等使用X光成像技术, 在简化条件下重构了快速床内的固含轴向分布。这种简化方法对工程应用较有吸引力。但是当时的X光技术还不很成熟, Weinstein使用胶片和读图器得到亮度信号的手段麻烦而且准确度较差。就重构算法而言, Abel算法需要事先将采到的亮度信号进行平滑处理, 会损失部分信息; Weinstein使用的弦吸收测量法(Chordal absorptiometry technique)事先限定了固含的分布形式, 也不太理想。

收稿日期: 2002-03-29, 修回日期: 2002-05-31

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(编号: 29725613); 教育部留学回国人员基金资助项目

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@fllotu.org.

本文在简化条件下,使用便携式 X 光成像系统,直接获得数字图像,同时改进标定系统,使用插值函数进行回归重构,使得测量更为准确、便捷.本系统可望用于流化床反应器内部流场的实时诊断.

2 实验装置

如图 1 所示,实验使用南通科电电子高科技开发的 Model 150-1 型手提式 X 光机(X 光管工作电压为 150 kV),和清华大学粒子技术与辐射成像实验室开发的 MiniX-1 探测箱.

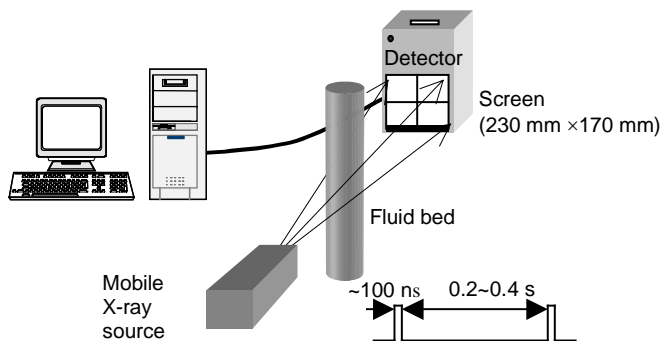


图 1 X 光成像系统
Fig.1 X-ray imaging system

X 光机每隔 0.3 s 左右发射一个 100 ns 的 X 光脉冲. X 光穿透拍摄对象后被探测器的增强屏接收到并转化为可见光,增强屏后面的 CCD 摄像头可以拍摄得到 230 mm×170 mm 范围内的投射图像(分辨率为 768×576),图像传给计算机进行处理,得到流化床内的颗粒浓度分布信息.

实验中的测量对象是内径 192 mm 的提升管.测量段是距离入口分布板 4 m 处的流化段^[6].操作条件为:气量为 400 m³/h,测量段压降>35 Pa/m.

3 测量原理

理想平行 X 射线透过均匀物质时的强度衰减满足 Lambert-Beer 定律:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

其中: I 是出射强度, I_0 是入射强度, μ 是线性吸收系数, x 是物质厚度.又由于空气对 X 光的吸收很弱,可以不考虑,所以通过固含为 α 的均匀颗粒层的出射 X 光强为

$$I = I_0 e^{-\mu \alpha x}. \quad (2)$$

沿 x 方向通过不均匀分布颗粒层的出射光强可表示为

$$I = I_0 e^{-\int \mu \alpha dx}. \quad (3)$$

实际的 X 光源可以看作球面光源(或点光源),X 光在传播过程中,将以距离的平方成反比的规律衰减.半径为 R_0 的光源发出的光强为 I_0 的 X 光,沿 x 方向通过固含分布为 α 的颗粒层,到达半径为 R 处的出射光强可用下式表达:

$$I = \frac{R_0^2}{R^2} I_0 e^{-\int \mu \alpha dx}. \quad (4)$$

4 图像处理方法

本文假设流化床内部的颗粒分布是具有轴对称性的. 实验为了更好地满足该假设, 每一个条件都拍摄了 20~30 帧图像, 并将这些图像叠加平均, 所以本文得到的结论都是时均意义上的结果. 图像处理的步骤为

拍摄 扣除背景 标定为质量厚度 重构计算.

4.1 拍摄

实验拍摄的对象包括流化床和标样. 标样是流化床内的流化颗粒, 装在三角形有机玻璃盒内, 其作用是提供将光强转化为质量厚度的标准. 实验还需要拍摄空床和空有机玻璃盒, 其作用是提供非颗粒的信息.

拍摄得到的图像经过过滤高亮斑点、几何校正、平均等预处理, 得到两幅图像: 背景图和流化图(图 2).

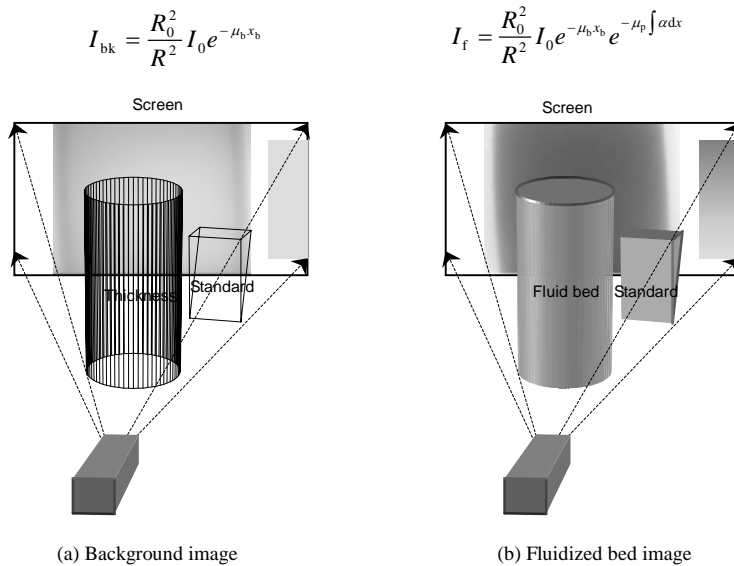


图 2 拍摄对象

Fig.2 Objects of photographs

4.2 扣除背景

上述步骤得到的两幅图片:(a) 背景图是指拍摄空床所得到的图像, 其光强分布 I_{bk} 只包含了床壁的信息;(b) 流化图是指拍摄床流化时得到的图像, 其光强分布 I_f 则同时包含了床壁和颗粒的信息. 图中所示 μ_b , x_b 分别是床壁的线性吸收系数和厚度, μ_p 是床内颗粒线性吸收系数. 将两者相除, 得到的仅有颗粒信息的光强分布:

$$I = \frac{I_f}{I_{\text{bk}}} = e^{-\mu_p \int \alpha dx} \quad (5)$$

实际计算时是将流化图像和背景图像的矩阵的对应点的数值相除, 得到的是可以图像化表示的光强矩阵. 该矩阵中的每一个数值描述的是原始强度为 1 的理想平行 X 光, 透射颗粒层后到达探测器接收屏的对应点时的强度. 假设在提升管稳定段轴向小范围内固含分布没有大的波动, 就可以取适当范围的光强沿轴向进行平均, 由此可以得到该区域的光强分布曲线(图 3), 图中横坐标为水平方向的位置(单位为像素 pix), 图中的实线是经过边界矫正后的光强曲线.

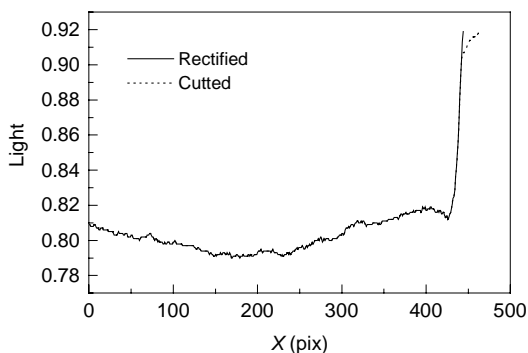


图 3 透射光强分布曲线
Fig.3 Transmitted X-ray intensity distribution

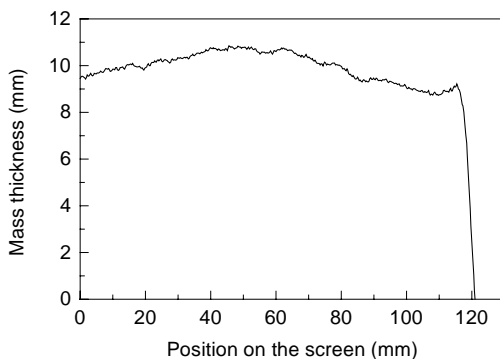


图 4 实测质量厚度曲线
Fig.4 The measured mass thickness curve

4.3 标定为质量厚度

式(4)为指数函数, 为了方便处理, 需要将指数形式的光强转化为质量厚度. 质量厚度指的是每一条 X 射线所透射的颗粒厚度的总和:

$$M = \int \alpha dx, \tag{6}$$

所以

$$I = e^{-\mu_0 M}. \tag{7}$$

但是在实际测量中由于有其他因素的影响, I 和 M 的关系不完全满足式(7), 实际使用的关系是标样曲线方程:

$$I = ae^{bM} + c. \tag{8}$$

由于该关系只能在一幅图像中才能保证系数是一定的(也就是说在不同的两张图像中的 a, b, c 可能不同), 所以要求每一幅图像都要有标样.

标样提供了一组 I 和 M 的关系, 用以回归出式[8]中的系数. 得到标样曲线方程就可以将式(5)中的 I 转化为 M , 也就是将光强曲线转化为质量厚度曲线, 简称实测 MT 曲线(图 4).

4.4 重构计算

重构算法改进了文献[5]中使用的弦吸收测量法. 固含径向分布用插值函数 $\alpha(r)$ 描述(程序中采用 Matlab 6 提供的 3 次 Hermite 插值函数). 在实验几何位置相同的条件下, 可计算得到 X 光透射该固含分布的流化床层的质量厚度分布. 如图 5 所示, X 射线沿 X 方向穿透床层, 设该路径为数轴, 垂足 H 为数轴原点. 固含与半径 r 的关系为 $\alpha(r)$, 而 r 可以被 x_1 所描述为 $r(x_1)$, 所以可以算出 X 射线穿透床层时通过的颗粒层质量厚度:

$$M = \int_{x_1=-x_2}^{x_2} \alpha(r) dx = 2 \int_{x_1=0}^{x_2} \alpha(r(x)) dx. \tag{9}$$

回归过程以实测 MT 曲线为回归目标, 回归参

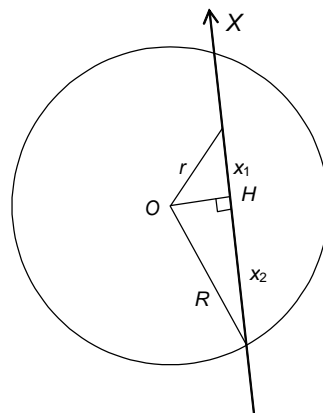


图 5 模拟原理图
Fig.5 Sketch for calculating the mass thickness

数为函数 $\alpha(r)$ 的 11 个插值点的 α 值, 回归结束条件是计算 MT 曲线与实测 MT 曲线的最小二乘值最小.

直接回归出来的结果会出现固含振荡的现象, 所以需要加强约束条件: 固含分布不会出现较大幅度的波动. 该约束条件的物理意义是在时均条件下固含分布是连续的, 没有波动的. 由于约束条件的数学描述难以实现, 所以目前的回归过程采用人机交互的方式, 手动调整固含分布, 计算机进行模拟计算. 一般情况下, 人工设定最靠近壁面的两个回归点的固含值后, 回归出其它点的固含值; 观察固含曲线形式后, 如果曲线出现波动, 根据经验调整靠近壁面两个的固含值的大小, 重新回归, 直到满足约束条件.

计算结果以及模拟出的质量厚度曲线与实测 MT 曲线比较如图 6 所示.

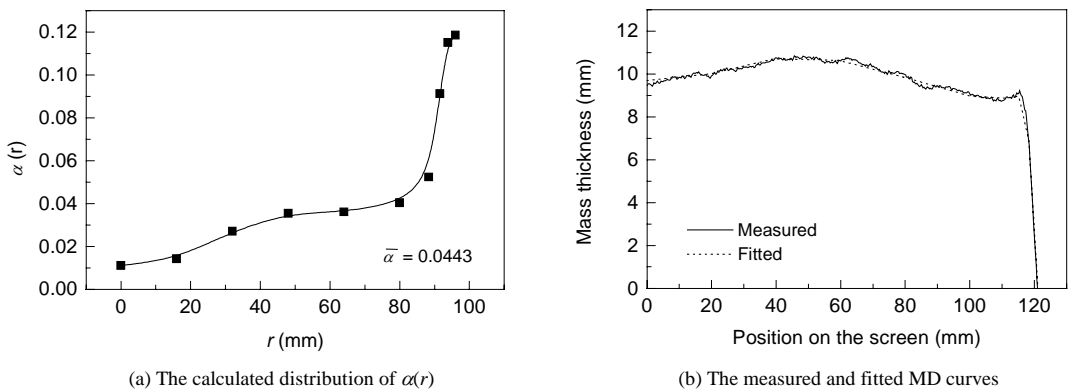


图 6 回归结果

Fig.6 The results from fitting data with the assumed voidage distribution

5 初步测量结果

本文将该 X 光成像系统用于测量气固循环流化床中的截面固含分布, 所用设备及操作条件在前文中已作介绍. 实验时用压差法得到的平均固含为 0.048. 用 X 光法测量的结果如图 6(a)所示,

用该分布作环面积分得到的平均固含为 0.0443. 两者结果比较吻合. 以下与之作对比的是相关文献中给出的固含计算关联式:

WEI 等^[7]给出了如下 Boltzmann 函数, 用于关联高固含情况下提升管中的实验数据:

$$\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} = 2.2 - \frac{2}{1 + e^{(10\phi - 7.665)}}, \quad 0.05 < \bar{\alpha} < 0.32. \quad (10)$$

ZHANG 等^[8]给出的关联式:

$$1 - \alpha = (1 - \bar{\alpha})^{(0.191 + \phi^{2.5} + 3\phi^{11})}, \quad (11)$$

其中 $\phi=r/R$ 为无因次径向坐标.

从图 7 可见, X 光测量结果较好地符合了前人的经验关联式, 证明该方法可以无干扰、较准

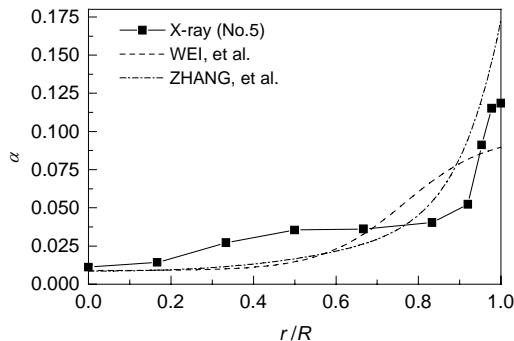


图 7 不同关联式与实验结果的对比

Fig.7 Comparison of determined $\alpha(r)$ with different correlations

确地测量气固两相流中的固含分布, 是一种无接触、快速测量气固两相流固含的方法。

在后续的研究中, 还对 X 射线成像法的误差分析、适用范围进行了更进一步的研究, 并对纳米颗粒聚团床、鼓泡床、大型下行床入口等设备中固含分布特征进行了测量。

符号表:

I	出射强度	x	物质厚度 (mm)
I_0	入射强度或光源光强	μ	线性吸收系数 (mm^{-1})
M	质量厚度 (mm)	α	固含

参考文献:

- [1] Azzi M, Turlier P, Bernard J R. Mapping Solid Concentration in a Circulating Fluid Bed Using Gammametry [J]. Powder Technology, 1991, 67: 27–36.
- [2] Kantzas A, Kalogerakis N. Monitoring the Fluidization Characteristics of Polyolefin Resins Using X-ray Computer Assisted Tomography Scanning [J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(10): 1979–1990.
- [3] William F Banholzer, Clifford L Spiro, Philip G Kosky, et al. Direct Imaging of Time-averaged Flow Patterns in a Fluidized Reactor Using X-ray Computed Tomography [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1987, 26: 763–767.
- [4] Shollenberger K A, Torczynski J R, Adkins D R, et al. Gamma-densitometry Tomography of Gas Holdup Spatial Distribution in Industrial-scale Bubble Columns [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(13): 2037–2048.
- [5] Weinstein H, Shao M, Wasserzug L. Radial Solid Density Variation in a Fast Fluidized Bed [A]. George E Klinzing. Fluidization and Fluid Particle Systems: Recent Advances [C]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1984. 117–121.
- [6] 刘会娥, 杨艳辉, 魏飞. 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): 431–435.
- [7] WEI F, LIN H, CHENG Y, et al. Profiles of Particle Velocity and Solids Fraction in a High-density Riser [J]. Powder Technol. 1998, 100: 183–189.
- [8] ZHANG W, Tung Y, Johnsson F. Radial Voidage Profiles in Fast Fluidized Beds of Different Diameters [J]. Chem. Eng. Sci., 1991, 46(12): 3045–3052.

Portable X-ray Photography of Solid Concentration in Gas–Solids Fluidized Beds — (I) Principle and Image Processing

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

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

Abstract: Presuming axial symmetry for the solid concentration, the portable X-ray photography technique was improved and applied to measure the radial solid concentration in a riser of a circulating fluidized bed. The principle and image processing are briefly introduced. Twenty to thirty images with 100~200 ns X-ray pulses were processed to get a time-averaged concentration profile. The main steps of this technique include getting photos, deducting the background, calibrating mass thickness map, and regressing calculation. As a demonstration, the radial profile of solid concentration in a $\phi 192$ mm riser was determined and compared with correlations in the literature.

Key words: X-ray; fluidized bed; solid concentration; image processing