

ECT 测量 A 类颗粒初始流化特性

罗琴^{1,2}, 张玉黎¹, 赵银峰¹, 叶茂¹, 刘中民¹

(1. 中国科学院 大连化学物理研究所, 辽宁 大连, 116023;
2. 中国科学院大学, 北京, 100049)

摘要: 利用电容层析成像技术对 Geldart A 类颗粒流化性质进行研究。研究发现: 流化床中固体质量分数随着气速的变化趋势与压力波动变化趋势具有一定的相似性, 即固体质量分数的突变点与压降的突变点一致, 据此可以推断出 Geldart A 类的最小流化速度, 为流化床基础流化特性研究提供新的研究手段。

关键词: 电容层析成像技术; 最小流化速度; 两相流测量

中图分类号: TQ021.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2016)11-3916-06

Measuring minimum fluidization velocity of Geldart particles by use of electrical capacitance tomography

LUO Qin^{1,2}, ZHANG Yuli¹, ZHAO Yinfeng¹, YE Mao¹, LIU Zhongmin¹

(1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The electrical capacitance tomography (ECT) technology was used to measure the minimum fluidization velocities of Geldart A particles in fluidized bed. The results show that the fluctuation of solid fraction obtained from the ECT images can be well related to the pressure drop profile along the bed by altering the gas velocity. As the pressure drop across the fluidized bed is considered as a standard method for determining the minimum fluidization velocity, which provides a method for measuring the minimum fluidization velocity of Geldart A particles.

Key words: electrical capacitance tomography; the minimum fluidization velocity; fluidized bed measurement

流化床具有传热效率高、气固接触好等优点, 在燃烧、化工、材料制备等领域得到了广泛的应用。GELDART 等^[1]根据颗粒的物性和流态化性质将颗粒分为 4 类, 其中 A 类颗粒广泛应用于化工过程中, 如流化催化裂化(FCC)催化剂和甲醇制烯烃(MTO)催化剂等。A 类颗粒有其特有的流化特性, 如可充气性、流化性能好等特点。最小流化速度是流化床本征性质, 传统的测量最小流化速度的方法是利用床层压降和床层高度随气速的变化曲线来求得^[2]。电容层析成像是

将医学断层成像(CT)和现代测量技术相结合的一种过程成像技术^[3]。其基本原理是通过传感器阵列电极之间电容的变化反映管道中多相介质的分布。目前国内外对于 ECT 的应用研究主要在于固体相浓度测量^[4-6]、流型识别^[7-8]、相关性测速度^[9-10]和流化床干燥过程的检测^[11-12]等。近年来电容层析成像技术(ECT)以其非侵入性、结构简单、成本低廉、安全性好、易于实现等特点, 得到了广泛的应用^[13-14]。本实验基于 ECT 的测量原理, 开展了对 A 类颗粒的流化性质的

收稿日期: 2016-01-15; 修回日期: 2016-03-09

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(91334205) (Project(91334205) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 叶茂, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事气固两相流模拟测量以及流化床反应器研究; E-mail: maoye@dicp.ac.cn

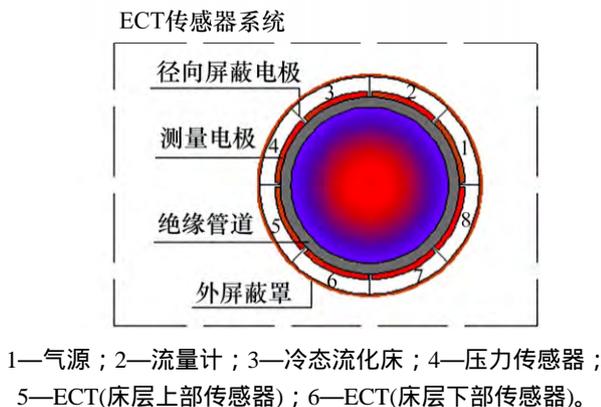
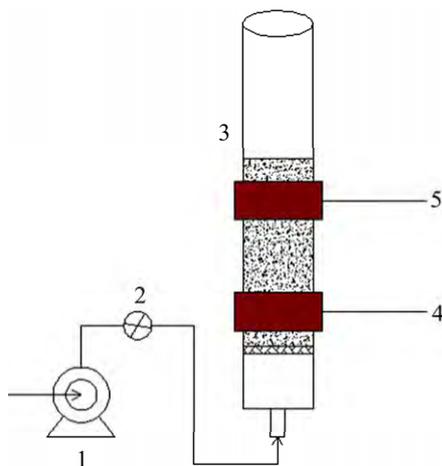
测量研究。根据流化床在流化前后床层特性, 提出一种基于 ECT 的方法来测量 A 类颗粒的流化特性。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置主要由流化床、流量计和测量系统 3 部分组成(如图 1 所示), 通过压缩空气管路对流化床进行供气, 采用 BROOKS SLA5850S1AAB1C2A1 型流量计控制气体流量。

流化床内径为 20.7 mm, 外径为 23.0 mm。实验测量系统以 ECT(电容层析成像)系统为主, 压力传感器为辅。其中压力传感器安装在气体分布板和进气空气之间, 测量的是整个床层和分布板的总压降。ECT 系统采用双平面 ECT 传感器, 同时测量床层顶部和底部的固体质量分数变化, 上、下平面 ECT 均采用 8 电极系统, 电极长度均为 2.5 cm, ECT 传感器系统电极分布如图 1 所示, 且电极中心距离流化床分布板距离分别为 5.25 和 22.25 cm。



1—气源; 2—流量计; 3—冷态流化床; 4—压力传感器; 5—ECT(床层上部传感器); 6—ECT(床层下部传感器)。

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental facility

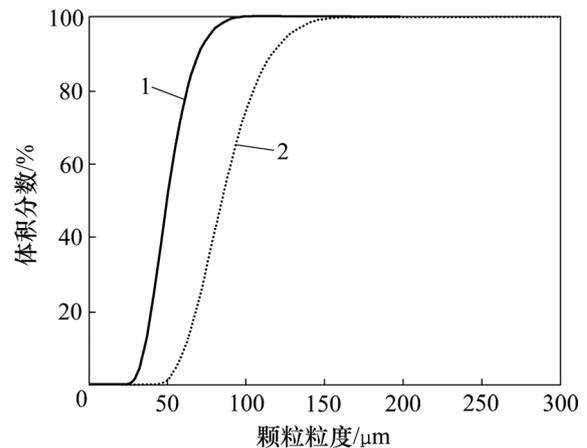
1.2 实验材料

实验所用的固体颗粒为商业生产所用的 DMTO 催化剂颗粒, 实验研究不同粒径的催化剂颗粒的流化特性, 测量得到不同粒径颗粒冷态实验条件下的初始流化特性, 如最小流化速度。将 DMTO 催化剂经过标准筛筛分成粒径为 80~106 μm 和 48~53 μm 的样品进行实验。用马尔文激光粒度仪测量实验颗粒的平均粒径以及粒度分布, 2 种样品的粒径分布如图 2 所示。实验材料的相关性质和实验条件如表 1 所示。

表 1 实验材料的相关性质和实验条件

Table 1 Experimental materials and experimental conditions

筛分孔径/ μm	$D_{[3,2]}$ / μm	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	颗粒 类型	总质量/ g	初始床层 高度/cm
80~106	81.78	1.52	A	70.0	25.3
48~53	48.09	1.52	A	67.3	24.7



筛分孔径/μm: 1—48~53; 2—80~106。

图 2 颗粒粒度分布图

Fig. 2 Particle size distribution

1.3 实验

本实验以 ECT 为主要测量手段, 结合压力传感器测量不同粒径 DMTO 催化剂颗粒的初始流化特性, 主要是最小流化速度。传统测量最小流化速度的方法是利用压降随风速的变化曲线求得, 本实验以压力传感器的测量结果为参照, 对比 ECT 的实验测量结果的准确性。

1.3.1 床层压降实验

本实验采用升速法研究最小流化速度。压力传感器安装在分布板和进气口之间, 测量整个床层和分布板的总压降, 在实验开始之前, 先测量空管的压降随风速变化曲线, 得到分布板压降和风速的函数关系。

实验时,总的压降减去分布板压降即为整个床层的压降。压力传感器数据采集频率为 100 Hz,每组气速采集 2 000 个数据。

1.3.2 ECT 量程标定

实验过程中,在未填料之前进行 ECT 空管的校准,然后将 2 种不同粒径的 DMTO 催化剂颗粒分别作为流化物料,加入到流化床内,填料量以覆盖整个 ECT 上平面测量电极,进行 ECT 满管的校准,同时记录颗粒填充量。

1.3.3 ECT 实验测量

实验开始测量前先用大气速让床层充分流化,消除填料对实验结果的影响,同时估计最小流化速度,以确定合理的实验气速范围,然后缓慢调节气速至 0 cm/s,稳定 30 min,进行 ECT 满管的校准,记录此时的初始床层高度并开始测量。测量时,先从零逐渐增大气速至床层达到完全流化状态,同时记录相应气速下压力传感器和 ECT 的测量数据,再依次降低气速至 0 cm/s,采用同样方法得到降速实验数据。基于 ECT 测量原理,得到测量管道平均截面的固体质量分数随气速的变化曲线。

本实验采用双平面 ECT 传感器系统,同时测量床层上部和下部固体质量分数随气速的变化,ECT 数据采集频率约为 55 Hz,每组气速采集 1 000 个数据。测量时,控制 ECT 传感器和压力传感器采集数据的同步性,便于进行对比分析。

2 验结果和讨论

2.1 ECT 测量结果

ECT 在线测量时,可以直观地反映测量管道内瞬时气固分布情况。表 2 所示为 2 种粒径分布的催化剂颗粒在不同气速下上、下平面气固分布图像。其中红色代表固体颗粒,当气速为零即床层初始状态,床层充满固体颗粒,此时上、下平面图像显示均为满管时的状态,即全红色;随着气速增加,床层内有气流通过,此时 ECT 测量的是管道内平均截面的气固分布,气速的增加导致颗粒流化,产生气流,由于固体颗粒和气体的介电常数差异导出测量电容发生变化,从而反应管道内的气固分布发生变化。对于粒径 48~53 μm 催化剂颗粒,在气速小于 0.253 cm/s 时,气固分布图像基本没有变化;当气速达到 0.258 cm/s 时,气固分布图像发生变化,红色变浅,表示此时固体质量分数下降,即床层膨胀,颗粒进入初始流化状态。对于粒径 80~106 μm 催化剂颗粒,也存在这样 1 个气速点,预示床层由固定床进入初始流化阶段,即气速达到 0.575 cm/s 时,颗粒进入流化状态。图 3 所示为 2 种不同粒径分布的催化剂颗粒在床层处于临界初始流化状态和床层刚进入初始流化状态时,ECT 测得的床层上、下部固体质量分数波动曲线。从图 3 可以看出:

表 2 粒径 48~53 μm 和 80~106 μm 的催化剂颗粒在不同气速下上、下平面气固分布图像

Table 2 Gas-solid distribution images of catalyst particles with particles sizes of 48–53 μm and 80–106 μm under different gas velocities

催化剂 粒径/ μm	位置及 方法	气速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)							
		0	0.119	0.253	0.258	0.282	0.307	0.317	0.377
48~53	床层上部 ECT测量								
	床层下部 ECT测量								
80~106	位置及 方法	气速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)							
		0	0.446	0.555	0.575	0.614	0.664	0.689	0.837
80~106	床层上部 ECT测量								
	床层下部 ECT测量								

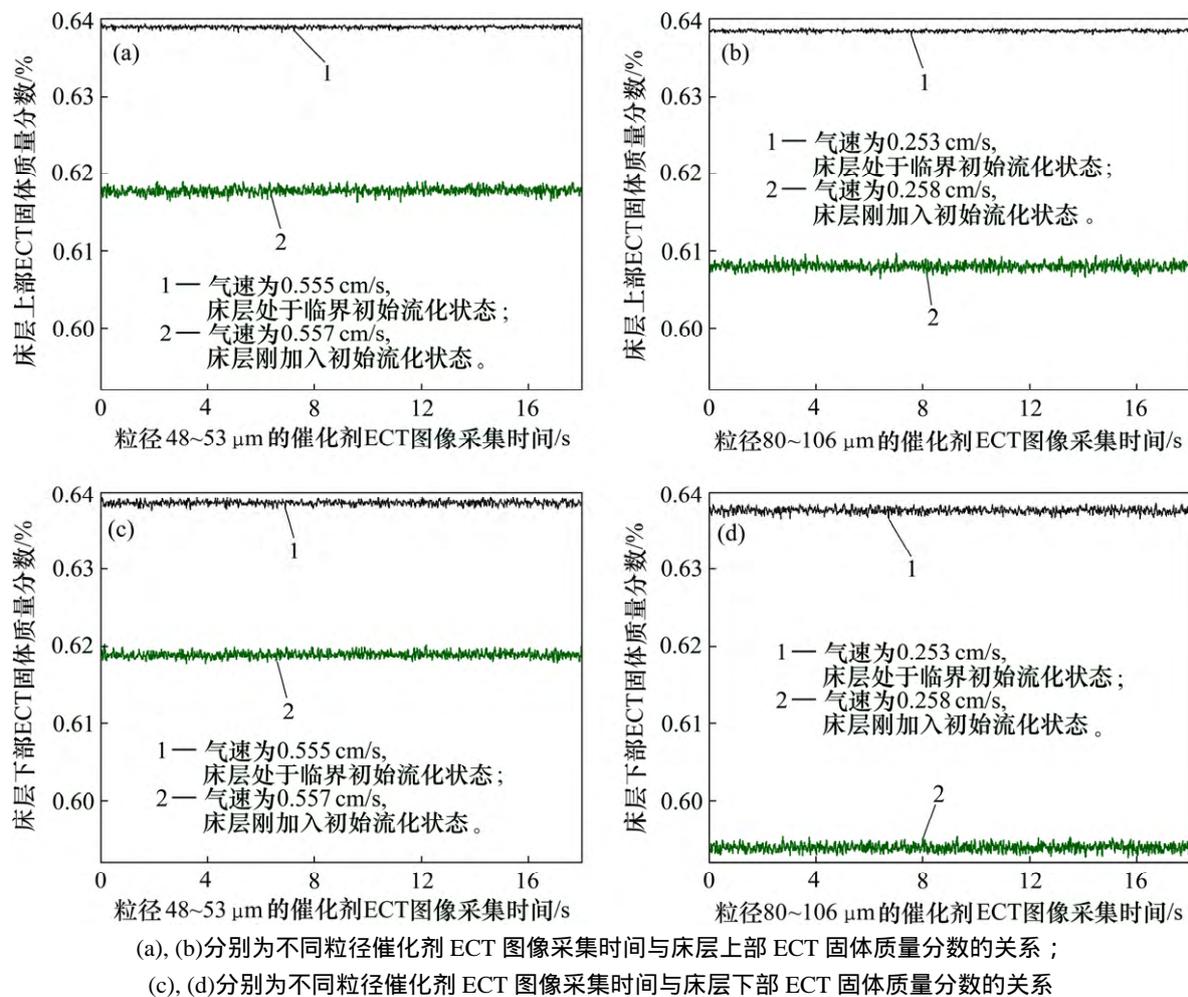


图 3 粒径 80~106 μm 和 48~53 μm 的催化剂颗粒在床层处于临界初始流化状态和刚进入初始流化状态时床层固体质量分数波动曲线

Fig. 3 Solid content curves of catalyst particles with particle sizes of 80~106 μm and 48~53 μm in and before initial fluidization bed

当床层处于临界初始流化状态时,床层上、下部测得的固体质量分数与床层初始状态基本没变化,且固体质量分数波动曲线平缓,而当气速稍大于临界最小流化速度时,床层此时由固定床进入初始流化状态,上、下平面固体质量分数平均值明显下降,且固体质量分数曲线波动也增大。对比表 2 和图 3 可知:粒径 48~53 μm 催化剂由固定床进入流化床固体质量分数分布图像和曲线变化更明显,这是因为小粒径颗粒充气性好,流化时床层膨胀更高,所以,固体质量分数下降更大,导致测图像变化更明显。

2.2 最小流化速度

最小流化速度是研究流态化过程的基础,也是流化床设计的重要参数之一。通常定义固定床压降曲线和完全流化时流化床压降曲线交点对应的气速为最小流化速度,它是流化床操作的最低气速,因此,对最小流化速度的研究一直受到重视^[15-20]。

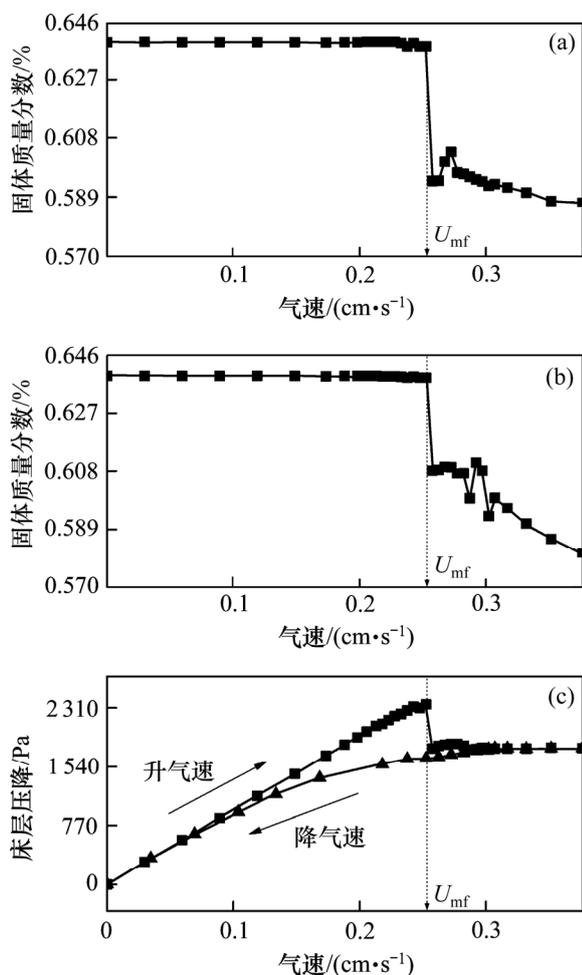
颗粒的最小流化速度通常应用降速法测定^[21],即

在较高的床层表观气速下(床层处于完全流化状态),逐渐降低床层表观气速,得到一系列床层压降和表观气速值,而后利用床层压降与床层表观气速的关系曲线,求出最小流化速度。但由于降速法忽略了颗粒间黏附力对流化性质的影响^[22],所以,本实验采用升速法研究最小流化速度,结果见图 4 和图 5。

由 ECT 实验结果可以直观发现当气速逐渐增加时,测量床层的固体质量分数在一定气速下会发生突变。为了更直观地描述这种变化情况,对 ECT 图像结果进行了处理,通过分析得到了 ECT 图像对应的平均固体质量分数,并根据气速变化情况给出了所测截面的平均固体质量分数变化曲线(见图 4 和图 5)。

图 4 给出了粒径 48~53 μm 颗粒的 ECT 测量结果和压力传感器测量结果的对比。由图 4 可以看出:在气速增加的开始阶段,床层压降呈上升趋势,此时 ECT 固体质量分数结果显示床层固体质量分数几乎没有变化;继续增加气速后,床层压降会有 1 个突变点,在

达到 1 个最大值后迅速降低,与此相对应的 ECT 固体质量分数结果同意出现了 1 个突变点,床层固体质量分数突然降低;随着气速继续增加,床层压降在经过突变点后稳定在一定范围内波动,而 ECT 结果显示床层固体质量分数会逐渐降低。从压降曲线可以看出:床层由固定床进入流化床需要克服颗粒间的相互作用力,升速流化曲线上出现 1 个突变点,此时气速即为最小流化速度。通过上下平面固体质量分数随气速的变化曲线可以看出,床层由固定床进入初始流化状态,固体质量分数也有 1 个突变点,且固体质量分数的突变点与床层压降突变点一致。也就是说,通过 ECT 监测床层固体质量分数同样观察到床层由固定状态向流化状态转变的气速点,即最小流化速度。继续增大气速,床层进入流化状态,此时床层发生膨胀,床层空隙率增大,床层固体质量分数将继续下降。

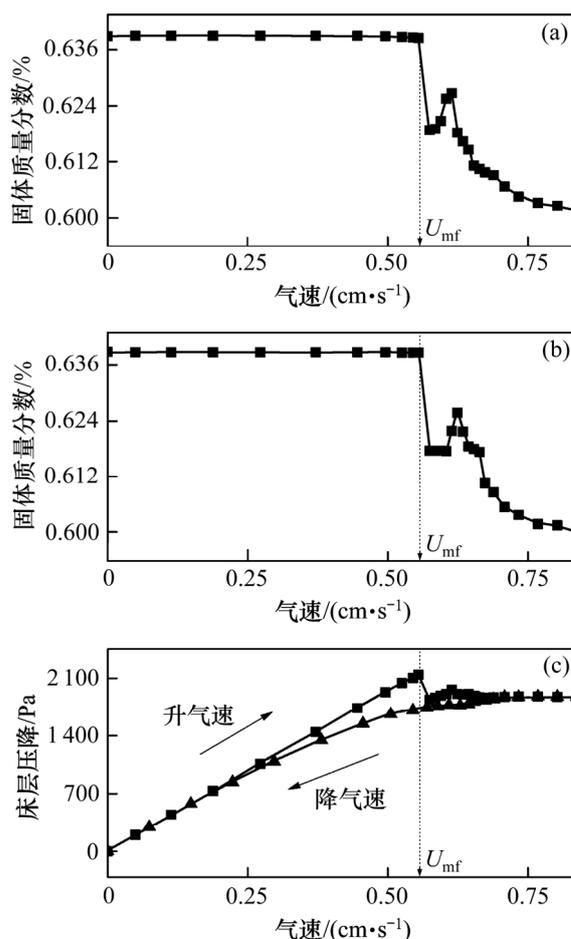


(a) 床层下部 ECT 固体质量分数 ;(b) 床层上部 ECT 固体质量分数 ;(c) 床层压降

图 4 粒径 48~53 μm 的催化剂上、下平面固体质量分数和床层压降随着气速的变化曲线

Fig. 4 Solids content and bed pressure drop curve with gas velocity for 48-53 μm catalysts

图 5 所示为粒径 80~106 μm 的催化剂上、下平面固体质量分数和床层压降随着气速的变化曲线。粒径 80~106 μm 颗粒测量结果(图 5)与粒径 48~53 μm 颗粒测量结果相似,随着气速增加,ECT 测量结果突变点与床层压降突变点对应气速相一致。同样能够观测到最小流化速度,与粒径 48~53 μm 颗粒相比,粒径 80~106 μm 颗粒具有更高的最小流化速度。



(a) 床层下部 ECT 固体质量分数 ;(b) 床层上部 ECT 固体质量分数 ;(c) 床层压降

图 5 粒径 80~106 μm 的催化剂上、下平面固体质量分数和床层压降随着气速的变化曲线

Fig. 5 Solids content and bed pressure drop curve with gas velocity for 80-106 μm catalysts

3 结论

1) 本次实验主要是用 ECT 来研究 A 类颗粒的流化特性,即最小流化速度。选用不同粒径分布的催化剂颗粒进行实验,通过固体质量分数和床层压降随气速的变化趋势具有一定的相似性和规律性,即固体质量分数的突变点与压降的突变点一致,由此可以判断最小流化速度。

2) 用 ECT 能够测量不同粒度颗粒的最小流化速度。

参考文献:

- [1] GELDART D. Type of gas fluidization[J]. Powder Technology, 1973, 7(5): 285-292.
- [2] TSINONTIDES S C, JACKSON R. The mechanics of gas fluidized beds with an interval of stable fluidization[J]. J Fluid Mech, 1993, 255: 231-214.
- [3] HUANG S M, PLASKOWSKI A, XIE C G, et al. Tomographic imaging of two component flow using capacitance sensors[J]. J Phys E: Sci Instrum, 1989, 22(3): 173-177.
- [4] DYAKOWSKI T, EDWARDS R B, XIE C G, et al. Application of capacitance tomography to gas-solid flows[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(13): 2099-2110.
- [5] DYAKOWSKI T, JEANMEURE L F C, JAWORSKI A J. Applications of electrical tomography for gas-solids and liquid-solids flows: a review[J]. Powder Technology, 2000, 112(3): 174-192.
- [6] 陈琪, 刘石, 阎润生. 下行床内颗粒浓度的电容层析成像测量的研究[J]. 热科学与技术, 2007, 6(2): 162-166.
CHEN Qi, LIU Shi, YAN Runsheng. Measurement investigation on solids distribution in down-flow fluidized bed using ECT[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 6(2): 162-166.
- [7] LIU S, YANG W Q, WANG H G, et al. Flow pattern identification of fluidized beds using ECT[J]. Journal of Thermal Science, 2001, 10(2): 176-181.
- [8] MAKKAWI Y T, WRIGHT P C. Fluidization regimes in a conventional fluidized bed characterized by means of electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(13): 2411-2437.
- [9] YANG W Q, LIU S. Role of tomography in gas/solids flow measurement[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2000, 11(3): 237-244.
- [10] MAKKAWI Y, OCONE R. Integration of ECT measurements with hydrodynamic modeling of conventional gas-solid bubbling bed[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(16): 4304-4315.
- [11] RIMPILÄINEN V, HEIKKINEN L M, VAUHKONEN M. Moisture distribution and hydrodynamics of wet granules during fluidized-bed drying characterized with volumetric electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 75(25): 220-234.
- [12] WANG H G, YANG W Q, SENIOR P, et al. Investigation of batch fluidized-bed drying by mathematical modeling, CFD simulation and ECT measurement[J]. AIChE Journal, 2008, 54(2): 427-443.
- [13] ZHANG W B, WANG C, YANG W Q, et al. Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement: a review[J]. Advanced Powder Technology, 2014, 25(1): 174-188.
- [14] 罗琴, 赵银峰, 叶茂, 等. 电容层析成像在气固流化床测量中的应用[J]. 化工学报, 2014, 65(7): 2504-2512.
LUO Qin, ZHAO Yinfeng, YE Mao, et al. Application of electrical capacitance tomography for gas-solid fluidized bed measurement[J]. CIESC Journal, 2014, 65(7): 2504-2512.
- [15] ABRAHAMSEN A R, GELDART D. Behavior of gas-fluidized beds of fine powders part I: homogeneous expansion[J]. Powder Technology, 1980, 26(1): 35-46.
- [16] SVAROVSKY L. Powder testing guide[M]. London: Elsevier Press, 1987: 40-52.
- [17] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
- [18] FRANTZ J F. Minimum fluidization velocity and pressure drop in fluidized beds[J]. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 1966, 62(1): 21-30.
- [19] LIPPENS B C, MULDER J. Prediction of the minimum fluidization velocity[J]. Powder Technology, 1993, 75(1): 67-78.
- [20] BIN A K. Prediction of the minimum fluidization velocity[J]. Powder Technology, 1994, 81(3): 197-199.
- [21] LOEZOS P N, COSTAMAGNA P, SUNDARESAN S. The role of contact stresses and wall friction on fluidization[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(24): 5123-5141.
- [22] YE M, VAN DER HOEF M A, KUIPERS J A M. The effects of particle and gas properties on the fluidization of Geldart A particles[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(16): 4567-4580.

(编辑 陈爱华)