

综述与专论

## 电容层析成像在气固流化床测量中的应用

罗琴<sup>1,2</sup>, 赵银峰<sup>1</sup>, 叶茂<sup>1</sup>, 刘中民<sup>1</sup>

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

**摘要:** 气固流化床广泛应用于化工、炼油、冶金、电力等工业生产领域。由于流化床中气固两相流动的复杂性, 流化床测量方法的研究成为了一个重要的研究领域。电容层析成像 (ECT) 是 20 世纪 80 年代以来发展起来的一种非介入式多相流测量技术, 已经在多相流测量领域发挥了重要作用。总结了国内外近年来应用 ECT 技术进行气固流化床测量的进展, 特别是对气固流化床内固体相浓度、流化床流型识别、固体相速度等方面工作进行了总结, 并简单介绍了 ECT 在流化床干燥中的应用, 讨论了 ECT 和其他测量方法结合使用情况。最后对 ECT 在流化床测量中的局限性和发展方向进行了讨论。

**关键词:** 流化床; 测量; 流态化; 成像

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.07.012

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2014) 07—2504—09

## Application of electrical capacitance tomography for gas-solid fluidized bed measurement

LUO Qin<sup>1,2</sup>, ZHAO Yinfeng<sup>1</sup>, YE Mao<sup>1</sup>, LIU Zhongmin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Although gas-solid fluidized beds have been widely used in various processes, the development of reliable and non-intrusive measurement techniques for solid-gas two-phase flows in fluidized beds is still attracting considerable attention. Due to its advantages of simple construction and high temporal resolution, electrical capacitance tomography (ECT) has been widely applied in multi-phase flow measurements. This paper reviews the application of ECT in gas-solid fluidized bed measurement, including the measurement of solids distribution, flow regime transition, solids flow velocity, and water content in fluidized bed dryers. The challenges of ECT in gas-solid fluidized bed measurement are also discussed.

**Key words:** fluidized bed; measurement; fluidization; tomography

### 引 言

气固流化床具有传热、传质效率高等优点, 被广泛运用于工业生产的各个领域, 如化工、炼油、冶金、电力等行业。由于流化床中床料颗粒种类 (如催化剂、煤粉、聚烯烃颗粒、矿石等) 变化范围大、

设备尺寸跨度宽 (从几毫米到几十米), 因而流化床内气固两相流呈现出复杂的时间和空间多尺度变化。流化床的优化设计和操作需要对流化床内复杂气固流动进行深入研究, 认清其机理。目前流化床的研究手段主要有模型和实验两大类。无论是模型还是实验研究, 首先要解决的就是流化床内气固流

2014-04-02 收到初稿, 2014-04-24 收到修改稿。

联系人: 叶茂。第一作者: 罗琴 (1990—), 女, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91334205)。

**Received date:** 2014-04-02.

**Corresponding author:** Prof. YE Mao, maoye@dicp.ac.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (91334205).

动的测量问题。准确可靠的测量方法有助于验证流化床模型。根据对气体相和颗粒相处理方法不同，目前常用的流化床模型有拉格朗日-欧拉模型和欧拉-欧拉模型两大类。由于流化床内流动的复杂性，拉格朗日-欧拉模型和欧拉-欧拉模型都需要用经验关联式（如气固间曳力关系）来闭合控制方程，需要在应用前借助可靠的流化床测量方法系统地进行实验验证。准确可靠的流化床测量方法还可以帮助优化流化床放大或者运行过程中的操作条件。在工业或者实验室流化床运行过程中，通过改变操作条件，对流化床内固体颗粒和气体分布以及流型进行调控，可以改善气固之间的传热和传质，从而达到优化的运行状态。流化床测量方法主要可以分为介入式和非介入式两大类。传统的流化床测量方法以介入式测量法为主，如热电偶和光纤探头等。这种方法将探头置于流化床内，对气固两相流动有一定扰动，容易产生较大误差。近年来非介入式方法得到了较快发展并应用于流化床测量。非介入式测量方法根据所用传感方式的不同，有超声、放射线、核磁共振、电学法等。电学法又包括电导、电阻、电磁、电容等，其中电容层析成像技术（electrical capacitance tomography, ECT）以其采样速率快、结构简单、成本低廉、安全性好、易于安装等特点，近年来得到了广泛的应用。

电容层析成像技术的发展开始于 20 世纪 80 年代<sup>[1]</sup>，是将医学断层成像（computer tomography, CT）和现代测量技术相结合的一种过程成像技术。其基本工作原理是被测对象内组分或浓度发生变化时，会引起介电常数的变化，最终导致电容传感器测得的电容值发生变化。电容层析成像技术主要采用多电极阵列式电容传感器，测量能够反映混合物介电常数分布的多对电容值。然后利用图像重构算法，实现被测区域内混合物浓度和组分分布的二维可视化。图 1 为一套完整的 ECT 系统，主要包括电容传感器系统、数据采集与处理系统和计算机成像系统 3 个部分<sup>[2]</sup>。经过三十多年的发展，研究人员对 ECT 的设计、算法和应用开展了大量的研究工作，ECT 技术日渐成熟，并被广泛用于多相流体系的测量研究。关于 ECT 硬件<sup>[3]</sup>、传感器设计<sup>[4]</sup>、图像重构算法<sup>[5]</sup>等，文献中已经进行了总结。如 Dyakowski 等<sup>[6-7]</sup>详细介绍了电（电容和电阻）成像原理、重构算法，并简单介绍了电成像技术在气固和液固两相流动中的测量工作。最近，Zhang 等<sup>[8]</sup>总结了近年来 ECT 在气固两相流测量中的应用。

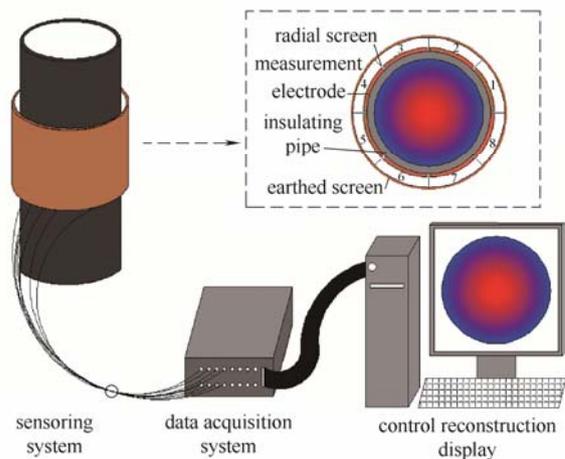


图 1 ECT 系统

Fig.1 ECT system

本文将介绍国内外近年来应用 ECT 技术进行气固流化床测量的进展，特别是对气固流化床内固体相浓度、流化床流型识别、固体相速度等方面工作进行了总结，并简单介绍了 ECT 在流化床干燥中的应用，讨论了 ECT 和其他测量方法结合使用情况。最后对 ECT 在流化床测量中的局限性和发展方向进行了讨论。

## 1 固体相浓度测量

在气固流化床中，固体相的浓度分布情况可以反映出流型以及流化状态，是需要测量的关键参数。早在 1997 年，Dyakowski 等<sup>[6]</sup>就开始研究将 ECT 用于气固两相流测量，他们发现测量电极的电容激发一般在低频率（低于 5MHz）、低电压（低于 20V）的情况下进行。ECT 系统的电容测量分辨率为 0.3 fF，图像空间分辨率取决于测量位置：靠近管壁时图像空间分辨率为管壁面积的 0.2%，而管中心的则为 2%。ECT 系统能够观测到流化床体系内气固分布的动态变化情况。Liu 等<sup>[9-10]</sup>使用 ECT 测量了方形循环流化床提升管内的固体浓度分布情况（如图 2 所示）。提升管横截面为 250 mm×250 mm 和 140 mm×140 mm。他们测量了不同气速下提升管截面的固体浓度分布，并比较了 LBP 算法和 Landwer 迭代算法的图像重建结果。他们发现在低浓度时两者的差别不大，而固体浓度越高时 LBP 算法对横截面中心位置的图像重建效果越差，这对选择合适的算法有指导意义。在流化床层不同高度，气固流动形态会发生变化。因此将 ECT 安装在提升管不同高度，测量提升管中不同截面固体平均体积分布，能够研究固体颗粒沿提升管高度的不均匀分

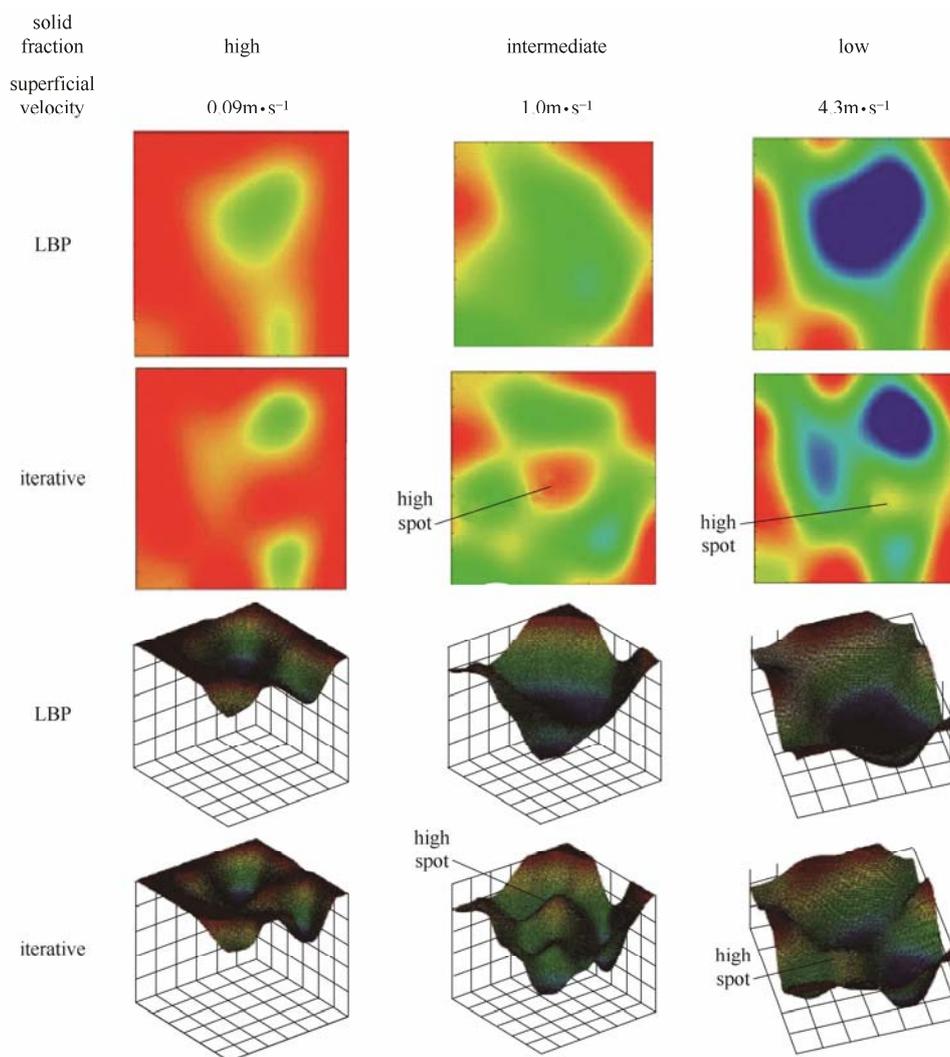


图 2 截面的固体分布<sup>[10]</sup>

Fig.2 Solids distributions in cross-section<sup>[10]</sup>

布，比较不同高度流化状态的差别。Hadi<sup>[11]</sup>将 ECT 和压力探针相结合，研究了直径 50 mm 的提升管内高度对固体浓度分布的影响。Malcus 等<sup>[12]</sup>用 ECT 研究了循环流化床提升管底部区域的气固两相流动，他们通过测量径向固体浓度曲线、概率密度分布曲线、标准偏差曲线和频谱，以此量化分析底部区域的流体流动结构并重点比较了壁面附近和中心区域的固体浓度标准偏差和概率密度分布，发现高度和颗粒质量流量的变化对底部区域流动影响很小，而壁面区域固体浓度始终比中心区域的要高，他们的测量是在内径为 140 mm 的提升管内进行，ECT 的空间分辨率达到 0.77 cm<sup>3</sup>。Du 等<sup>[13]</sup>用 ECT 对比了密相流化和密相输送条件下固体浓度分布随床层高度变化的情况，利用 ECT 测得的准三维图像，发现了密相流化区域和密相输送区域固体浓度

分布的显著差异。Sidorenko 等<sup>[14]</sup>用 ECT 研究了压力对流化性能的影响，实验压力变化范围为 101~2100 kPa，流化床直径为 150 mm，他们用 ECT 测得了不同压力下 A 类颗粒和 B 类颗粒的瞬时床层固体浓度分布，并分析了压力对平均床层空隙率和平均循环频率的影响。Cao 等<sup>[15]</sup>用 ECT 研究了加压喷射流化床的流化特性，考察了压力对气泡大小和平均床层孔隙率的影响。Wang 等<sup>[16]</sup>对有水平气体/气固射流的气固流化床特性进行了研究，实验用 ECVT 对射流过程进行成像分析，研究了气体射流和气固混合射流对床层的影响，如射流引起的床层气固分布的变化、射流形状、穿透长度和宽度等，并对比了气体射流和气固射流的不同。

随着 ECT 测量系统软件和硬件的不断发展，其应用范围也在逐渐变宽。陈琪等用 ECT 测量得到旋

风分离器中固体浓度分布的 2D 图像及与之相对应的等值线分布图, 并从中得到固体浓度的分布规律<sup>[17]</sup>; 他们还利用 ECT 对下行床内气固流动情况进行了研究<sup>[18]</sup>, 并比较了流化风量、颗粒质量对测量截面(上截面平均直径 150 mm, 下截面平均直径 300 mm) 固体颗粒体积份额平均值的影响。Wang<sup>[19]</sup>用 ECVT 研究了气速对循环流化床提升管弯管处的气固流动的影响, 通过分析不同气速、不同固体通量下的水平管、弯管的固含率分布和存在的流动结构, 观察比较弯管的水平部分和竖直部分、壁面附近和中心区域、水平管底部和弯管顶部存在的特殊变化。

气固流化系统中, 噎塞是指随着操作条件的变化, 床层中的颗粒浓度会突然增大或减小, 是气固两相流系统中典型的结构突变现象。Du 等<sup>[20-22]</sup>将 ECT 用于循环流化床中噎塞现象的研究, 通过研究 ECT 测得的循环流化床提升管的实时准三维横截面流动结构来探测噎塞现象形成过程, 实验分别在内径为 0.05 m 和 0.1 m 的提升管内进行, 对比 A 类 (FCC 催化剂) 和 B 类 (沙子) 颗粒噎塞现象的不同, 通过观察噎塞过渡态的固体浓度分布, 考察床层结构变化、固体循环率、气速以及不同颗粒对噎塞现象的影响。

颗粒性质是影响流化状态的主要因素。White 使用 ECT 成像分析了床层颗粒材料和颗粒大小对鼓泡流化床气泡结构的影响<sup>[23]</sup>, 实验发现鼓泡流化床中细颗粒浓度稍微增加会引起气泡结构的明显变化, 而这种变化会改变流化床中气固接触效率, 从而显著影响床层催化反应选择性和气体停留时间<sup>[24]</sup>。Rautenbach 等<sup>[25]</sup>使用 ECT 研究了细颗粒对 B 类和 D 类颗粒流态化的影响, 实验装置直径为 10.4 cm, ECT 的空间分辨率可达 1.79 cm, 通过实验测量他们发现细颗粒的存在会产生更小的气泡, 从而提高流化质量, 这对流化床反应器的操作优化具有指导意义。

同样, 内构件也是流化床流化状态优化的重要手段之一。Wang 等<sup>[26]</sup>使用 ECT 考察了内构件对提升管流型的影响, 通过改变内部构件的排列方式, 测量床层不同高度处的动态特性, 研究了床层内部构件的尺寸、安装高度、组合情况对流化状态的影响, 这对于优化气固两相流动, 提高流化床传热、传质, 提高反应效率和选择性是很有意义的。

## 2 流型识别测量

随着流化床操作气速的增加, 流化床内两相流

流型会发生转变。一般来说, 流化床内的两相流流型会呈现固定床、鼓泡床、节涌床、湍流床、快速床以及气力输送等不同形式。对流化床内部气固两相流型进行观测和识别, 对于控制流化床的操作具有重要意义。传统的压力或者光纤探头难以实现流化床内两相流流型的识别。ECT 技术能够快速测量出流化床内的气固分布情况, 使流型识别的研究成为可能。Liu 等<sup>[27-28]</sup>针对循环流化床底部方形结构, 设计了测量方形流化床的 ECT 电极, 可以用于流型识别。Liu 等通过调节气速来达到不同的流化区域——鼓泡流化状态、节涌流化状态和循环流化状态, 通过 ECT 测量获得了这 3 种流化状态的一般特性以及不同流化态下固体浓度分布和空隙分布规律。Makkawi 等<sup>[29]</sup>用 ECT 和压力测量研究了 Geldart B 类颗粒流化性质随气速的变化, 提出用明显的过渡态转变速度识别鼓泡、节涌、湍动和快速流化等不同的流化状态。实验中使用了双平面 ECT 电极布置测量内径 150 mm 的流化床内固体流化状态, 并且对不同床层高度的气泡性质随气速变化的情况进行了研究。Makkawi 等<sup>[29]</sup>还将 ECT 与压力测量方法相结合, 对不同的流型进行了综合的分析。使用的分析方法包括成像图片分析 (逐帧分析和成像分析)、压力降分析、平均固含量分析、局部固含量分析、标准方差分析、振幅分析、频率分析、功率谱分析、气泡上升速度分析等, 通过这些分析手段, 揭示不同流化区域的具体特征, 并确定流型变化的转化速度。Wang 等<sup>[30]</sup>用 ECT 测量了鼓泡流化和湍动流化态下的横截面固体浓度分布, 分析对比两种流化态下气泡分散情况、中心区域和壁面附近的固体浓度波动偏差, 并用 ECT 测得的实验数据来校验 CFD 模型, 发现结果能很好地吻合。他们还通过对比连续的 ECT 测量图像, 发现不管是在鼓泡流化还是节涌流化, 床层都有气泡产生。但在节涌流化状态, 固体颗粒浓度分布的变化比鼓泡流化剧烈, 且平均固体浓度值较小, 气泡更容易发生聚合, 同时此时壁面效应对气泡的影响也较大。Du 等<sup>[31]</sup>用 ECT 测量了直径为 0.05、0.1 和 0.3 m 的气固流化床中的固体浓度分布, 并对比不同床层直径下流态化状态随气速的变化, 如鼓泡流化、节涌流化和湍动流化。

## 3 固体相速度测量

由于气固两相流的复杂性和不均匀性, 流化床内固体颗粒的速度测量一直是流化床研究的一个难点。基于 ECT 技术, Yang 等<sup>[32]</sup>提出了双层电容层

析传感器设计，在流动方向上布置两套相同的电容传感器，并同时对其进行数据采集，然后根据这两组数据之间的相关关系计算出固体流动的速度。双层电容层析成像传感器相关测速是基于流体脉动信号的传播特性具有一定的重复性，即上一时刻得到的信号与下一时刻得到信号是相似的，具有相关性，如图 3 所示。相关计算公式为

$$P_{xy}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)y(i+j) \quad (j = 0, 1, 2, \dots, M)$$

式中  $x(i)$  为上游测得的信号， $y(i+j)$  为下游测得的信号， $N$  为相关取样个数的和， $M$  为相关取样个数， $j$  为延迟时间。

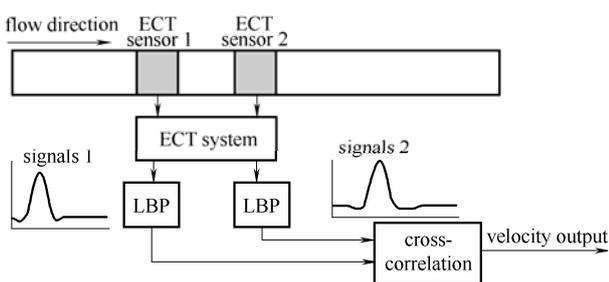


图 3 采用互相关分析方法测量速度<sup>[10]</sup>

Fig.3 Flow velocity measurement using cross-correlation<sup>[10]</sup>

Liu 等<sup>[10]</sup>介绍了双平面传感器 ECT 系统和互相关技术(图 3)，以及其在旋风分离器测速方面的应用。Wang 等<sup>[33]</sup>利用双平面传感器 ECT 系统测量了气力输送过程中栓柱的速度和长度。孙猛等<sup>[34]</sup>综合利用电容层析成像技术及互相关分析方法，在线同时测量出固体颗粒的浓度及切向速度。同时，他们还根据同层传感器相邻电极之间的相关计算得出切向旋转速度，并且通过对截面浓度分布、电容信号的波动特性及其概率密度和频率特性的分析证明了这种测试方法的可行性及可靠性。Makkawi 等<sup>[35]</sup>通过 ECT 的测量数据，用数值模拟来估算气固两相流的一些重要的流体力学参数，如颗粒速度、空隙气速、颗粒间接触力等。

#### 4 流化床干燥过程

流化床干燥器因其特有的优势而普遍用于药品的干燥过程，因此对流化床干燥器流化状态的调控是控制药品质量的关键。了解药品干燥过程中的床层动态变化和影响因素对于控制并保证产品质量至关重要。ECT 技术能够通过监测流化床中的空隙率达到实时监控流化床流化状态变化的目的。但是在流化床干燥器中，干燥过程中湿度的变化会引起

介电常数的变化，使 ECT 的结果分析变得更为复杂，如何克服这一难题是 ECT 用于流化床干燥器动态监测的关键。

Wang 等<sup>[36]</sup>研究了含水量和激发频率对测量结果的影响(图 4)。发现低含水量时电容与激发频率呈简单线性关系，而在高含水量时两者之间的关系为非线性并且变得更加复杂。他们采用不同的正则化方法进行图像重建，发现低含水量时不同模型成像差不多一致。不过随着含水量增加，不同模型之间的差异会越来越大。对于环核流动结构，激发频率为 4 MHz 时的测量结果最好，但当流型呈现三核分布时应该根据含水量的高低来选择最合适的激发频率。一般来说低含水量时应选择低的激发频率，高含水量时应选择较高的激发频率。Chaplin 等<sup>[37]</sup>利用统计学方法<sup>[38-40]</sup>修正了湿度对介电常数测量结果的影响，将 ECT 应用于流化床干燥药品颗粒的研究中，他们通过 ECT 的断层影像给出相态分布、关键气泡等床层局部动态变化，研究床层固体颗粒填充量和含水量对干燥过程中颗粒夹带、分离和非均匀混合等这些引起产品退化的因素的影响，他们发现含水量(质量分数)在 5%~20% 时，流化床干燥器中心区域的流动特性变化很小。

Makkawi 等<sup>[41]</sup>利用 ECT 测量鼓泡流化床中潮湿颗粒干燥过程中的传质系数，并将实验测量结果与基于纯扩散传质模型的预测结果相对比，发现有一定的吻合度。这在一定程度上证明了 ECT 用于干燥传质方面测量的可行性，同时也说明 ECT 测量对于传质过程相关计算模型的优化也有一定的作用。Chaplin<sup>[42]</sup>用 ECT 研究床层负荷对流化床药品颗粒干燥过程中流动结构的影响，并结合统计学方法对 ECT 原始测量数据进行分析，得到了与 Makkawi 等<sup>[41]</sup>相同的结论。Tanfara 等<sup>[43]</sup>研究了小型锥形流化床干燥器中颗粒粒度分布对局部空隙率的影响，实验对 5 种不同粒度分布的颗粒进行了研究，用双平面 ECT 系统测量空隙率，通过不同测量高度和不同气速下的空隙率等值线图来分析粒度分布对干燥过程的影响。Rimpiläinen 等<sup>[44]</sup>用 ECT (ECVT) 研究了气速对干燥过程的影响，结果表明，在忽略气速影响时，边缘附近的平均湿度值的估算最准确。Wang 等<sup>[45]</sup>利用 ECT 对间歇流化床干燥器进行了研究，并用测量得到的固体浓度径向分布结果对 CFD 模拟结果进行了验证。对含水量的测量结果显示与湿度计测量结果相比有 5% 的误差，并根据 ECT 测量结果，提出了用 ECT 进行流化床干燥器固体水分

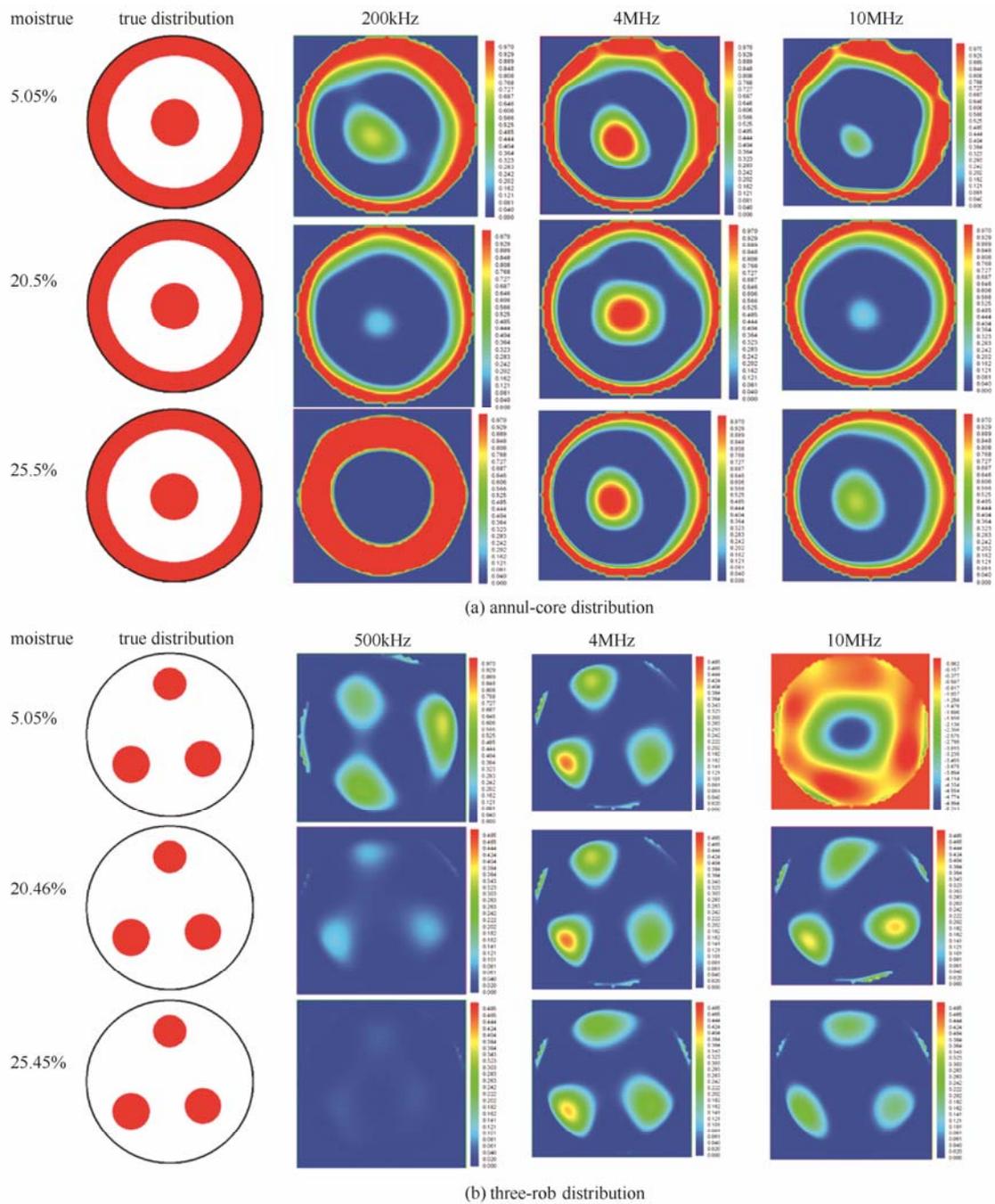


图 4 不同湿度下环核结构和三点结构的重构图像<sup>[36]</sup>

Fig.4 Image reconstruction of annul-core and three-rob distributions with different moisture<sup>[36]</sup>

的在线测量和控制的方法<sup>[46]</sup>。

### 5 与其他测量方法组合应用

气固流化床中流化状态复杂，难以直接观察。通常需要结合多种测量手段进行分析。ECT 与光纤探针技术<sup>[47]</sup>、核磁共振成像 (MRI) <sup>[48]</sup>相结合能够对循环流化床局部和平均的气固分布状况进行研究。ECT 与示踪技术相结合可以研究湍动流化床中

的气固混合现象。ECT 结果给出了气速、压力、温度和细颗粒对床层中气固分布的影响。氦气和荧光粉示踪技术研究鼓泡和湍动气固流化床中气固混合行为<sup>[2]</sup>。Marashdeh 等<sup>[49]</sup>采用 ECT 系统，通过测量介电常数和电导率来构建空隙率图像，研究颗粒流的双模态成像，估算固体体积分数和速度分布。该成像系统同时具有 ECT 和电导率测量系统的功能，通过电导率和温度的关系，能够测量热性能，如热

导率、传热性能等。Zhang 等<sup>[50]</sup>利用静电传感器和双层 ECT 系统相结合的方式测量了流化床体系中颗粒平均速度，其中颗粒浓度较密的流化状态用双层 ECT 系统测量颗粒速度，对于颗粒浓度较稀的流化状态，ECT 信号弱，采用静电传感器测量方法对颗粒速度进行测量（图 5）。

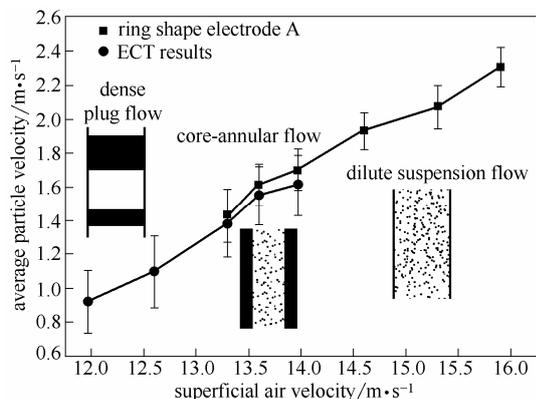


图 5 静电和 ECT 传感器测量颗粒平均速度<sup>[50]</sup>

Fig.5 Average particle velocities obtained from electrostatic sensor and ECT sensor<sup>[50]</sup>

## 6 ECT 用于流化床测量面临的挑战

采用电容层析成像（ECT）技术测量流化床内气固两相流流动结构、气固两相传递、颗粒流动速度以及气泡特性（如气泡大小、形态、变化等）等的研究目前已取得了一定的进展，特别是在固体浓度分布测量、固体颗粒速度测量、流型识别等方面均取得了一系列成果。但是由于气固两相流本身的复杂性、多变性以及 ECT 测量系统自身的局限性，ECT 广泛应用于流化床测量还面临许多挑战。

(1) 流化床尺寸的限制。从表 1 可以看出，目前应用 ECT 测量的流化床设备尺寸一般为 50~300 mm。流化床尺寸过大或过小都会给测量带来一定的难度。一方面，如果流化床设备尺寸过大，根据 ECT 成像原理（灵敏度场的分布不均），中心区域的空间分辨率会较低。一般而言，设备尺寸越大，中心区域的分辨率越低，成像就越困难。同时设备尺寸的增大也会导致边缘效应的影响增加。另一方面，设备尺寸过小会导致 ECT 电极制作上的困难。目前 ECT 系统的电极能稳定测定的电容最小为 0.01 fF，这就限制了电极长度不能太短。可是对于

表 1 ECT 在气固流化床中的相关应用

Table 1 Application of ECT in gas-solid fluidized bed

文献	设备尺寸/mm	固体颗粒种类	粒径/ $\mu\text{m}$	ECT 电极个数	电极长度/mm	频率/Hz
[12]	140	FCC	89	8	40	100
[9-10,27,29]	140×140	沙子	150	12	100	18
	250×250		280			
[23-24]	200	氧化铝	113	12	75	100
		铅沙	153			
[29]	150	玻璃球	150~1000	8	38	100
[20-22]	50	FCC	60	12	50	100
	100	沙子	240			
[14]	150	FCC	77	12	50	81
		石英	203			
[13,31]	50	FCC	60	12	50	100
	100					
	300					
[30]	140×140	沙子	300	12	100	NA
[18]	150	玻璃珠	57.1	8	100	NA
	300					
[35]	140	玻璃珠	350	8	38	100
			125			
[11]	50	焦炭颗粒	135	12	55	50
[16]	300	FCC	60	12	NA	80
[25]	104	NA	混合 100~1000	12	100	100

尺寸很小的设备, 电极长度越短, ECT 测量结果越能反映真实的流化状态。

(2) 空间分辨率的限制。一般来说, 与核磁共振成像、放射线等方法相比, ECT 技术的空间分辨率较低 (一般在厘米级别), 限制了其应用范围。如鼓泡床 ECT 图像测量中得到的大气泡边界模糊, 小气泡则难以分辨。ECT 空间分辨率取决于电极数目和电极长度。如前文所述, 目前 ECT 系统的电极能稳定测定的电容最小为 0.01 fF, 因此电极长度不能太短。除此之外, 电极的长短还受到边缘效应、流化床内颗粒的介电常数、流化状态、流化床壁面厚度等的影响。如在测量气泡特性时, 电极长度需要与气泡尺寸匹配, 否则得到的图像不能反映真实的气泡特性。再如在颗粒介电常数低的流化床测量中, 电极长度需要增长以增加信噪比。

(3) 低颗粒浓度区域检测困难。当颗粒浓度较稀时, 因为介电常数变化范围小, 相应的电容信号弱, 因而导致 ECT 测量困难。这使得 ECT 在流化床内稀相空间气固分布测量方面仍然是个挑战。

(4) 高温条件。ECT 实验大都在常温、常压的冷模装置中进行, 进行热态研究的较少。这主要是高温下电极布置比较困难, 同时介电常数与温度存在复杂的关联影响。如何将 ECT 技术应用于高温流化床的检测中, 也是一个极具挑战性的问题。如果能解决 ECT 的高温使用问题, 其应用前景将更为广泛。这也是未来 ECT 硬件研究的一个发展方向。

(5) 工业流化床测量。目前 ECT 技术主要应用于实验室气固流化床的测量, 流化床的尺寸相对较小。而对大尺寸的工业气固流化床, ECT 的应用报道较少。在大尺寸气固流化床体系中, ECT 空间分辨率进一步降低, 同时相应的信号传输线的长度也会增加, 从而影响 ECT 测量结果。如何应对这些挑战对 ECT 的工业应用至关重要。

## 7 结束语

到目前为止, ECT 在气固流化床测量研究中发挥了重要作用, 取得了一些重要的进展。但 ECT 的空间分辨率低、信号弱等不足限制了其应用, 这也为 ECT 的发展提供了方向。为了拓展 ECT 的应用领域, 针对高温流动等领域的应用研究还需要进一步加强。

## References

[1] Huang S M, Plaskowski A, Xie C G, Beck M S. Tomographic imaging

- of two component flow using capacitance sensors [J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1989, **22**: 173-177
- [2] Du B, Fan L S, Wei F, Warsito W. Gas and solids mixing in a turbulent fluidized bed [J]. *AIChE Journal*, 2002, **48**: 1896-1909
- [3] Yang W Q. Hardware design of electrical capacitance tomography systems [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**: 225-232
- [4] Yang W Q. Design of electrical capacitance tomography sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2010, **21**: 1-13
- [5] Yang W Q, Peng L H. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**: R1-R13
- [6] Dyakowski T, Edwards R B, Xie C G, Williams R A. Application of capacitance tomography to gas-solid flows [J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, **52**: 2099-2110
- [7] 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**: 174-192
- [8] Zhang W B, Wang C, Yang W Q, Wang C H. Application of electrical capacitance tomography in particulate process measurement—a review [J]. *Advanced Powder Technology* (in press)
- [9] Liu S, Yan R S, Wang H G, Jiang F, Dong X Y. Applications of electrical capacitance tomography in two-phase flow visualization [J]. *Journal of Thermal Science*, 2004, **13**: 179-186
- [10] Liu S, Chen Q, Wang H G, Jiang F, Ismail I, Yang W Q. Electrical capacitance tomography for gas-solids flow measurement for circulating fluidized beds [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2005, **16**: 135-144
- [11] Hadi B. Characterization of multi-phase flow in circulating fluidized beds using electrical capacitance tomography (ECT) [D]. Canada: The University of Western Ontario, 2009
- [12] Malcus S, Chaplin G, Pugsley T. The hydrodynamics of the high-density bottom zone in a CFB riser analyzed by means of electrical capacitance tomography [J]. *Chemical Engineering Science*, 2000, **55**: 4129-4138
- [13] Du B, Warsito W, Fan L S. Behavior of the dense-phase transportation regime in a circulating fluidized bed [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, **45**: 3741-3751
- [14] Sidorenko I, Rhodes M J. Influence of pressure on fluidization properties [J]. *Powder Technology*, 2004, **141**: 137-154
- [15] Cao J T, Cheng Z H, Fang Y T, Jing H M, Huang J J, Wang Y. Simulation and experimental studies on fluidization properties in a pressurized jetting fluidized bed [J]. *Powder Technology*, 2008, **183**: 127-132
- [16] Wang F, Yu Z, Marashdeh Q, Fan L S. Horizontal gas and gas/solid jet penetration in a gas-solid fluidized bed [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, **65**: 3394-3408
- [17] Chen Qi (陈琪), Li Jingtao (李惊涛), Liu Shi (刘石). The ECT measurement of thin cayer matter distribution in the two-phase flow [J]. *Industrial Heating* (工业加热), 2006, **35**: 24-26
- [18] Chen Qi (陈琪), Liu Shi (刘石), Yan Runsheng (阎润生). Measurement investigation on solids distribution in down-flow fluidized bed using ECT [J]. *Journal of Thermal Science and Technology* (热科学与技术), 2007, **6**: 162-166
- [19] Wang F. Gas-solid fluidization: ECVT imaging and mini-/micro-channel [D]. USA: The Ohio State University, 2010
- [20] Du B, Fan L S. Characteristics of choking behavior in circulating fluidized beds for group B particles [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, **43**: 5507-5520

- [21] Du B, Warsito W, Fan L S. ECT studies of the choking phenomenon in a gas-solid circulating fluidized bed [J]. *AIChE Journal*, 2004, **50**: 1386-1405
- [22] Du B, Warsito W, Fan L S. Imaging the choking transition in gas-solid risers using electrical capacitance tomography [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2006, **45**: 5384-5395
- [23] White R B. Using electrical capacitance tomography to monitor gas voids in a packed bed of solids [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**: 1842-1847
- [24] White R B. Using electrical capacitance tomography to investigate gas solid contacting [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2005, **83**: 64-67
- [25] Rautenbach C, Melaaen M C, Halvorsen B M. Statistical diagnosis of a gas-solid fluidized bed using electrical capacitance tomography [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, **49**: 70-77
- [26] Wang C P, Lü Z A, Li D K. Experimental study on gas-solids flows in a circulating fluidised bed using electrical capacitance tomography [J]. *Powder Technology*, 2008, **185**: 144-151
- [27] Liu S, Yang W Q, Wang H G, Jiang F, Su Y. Investigation of square fluidized beds using capacitance tomography: preliminary results [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**: 1120-1125
- [28] Liu S, Yang W Q, Wang H G, Yan G, Pan Z. Flow pattern identification of fluidized beds using ECT [J]. *Journal of Thermal Science*, 2001, **2**: 176-181
- [29] 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**: 2411-2437
- [30] Wang H G, Yang W Q, Dyakowski T, Liu S. Study of bubbling and slugging fluidized beds by simulation and ECT [J]. *AIChE Journal*, 2006, **52**: 3078-3085
- [31] Du B, Warsito W, Fan L S. ECT studies of gas-solid fluidized beds of different diameters [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, **44**: 5020-5030
- [32] Yang W Q, Liu S. Role of tomography in gas/solids flow measurement [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2000, **11**: 237-244
- [33] Wang H G, Liu S, Jiang F, Yang W Q. Dual-plane electrical capacitance system and usage in experience [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2002, **2**: 3-6
- [34] Sun Meng (孙猛), Liu Shi (刘石), Lei Jing (雷兢), Liu Jing (刘靖). Concentration and angular velocity measurement in the dipleg of a cyclone separator using ECT [J]. *Journal of Basic Science and Engineering (应用基础与工程科学学报)*, 2008, **16**: 757-761
- [35] Makkawi Y, Ocone R. Integration of ECT measurements with hydrodynamic modeling of conventional gas-solid bubbling bed [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, **62**: 4304-4315
- [36] Wang H G, Yang W Q. Measurement of fluidised bed dryer by different frequency and different normalization methods with electrical capacitance tomography [J]. *Powder Technology*, 2010, **199**: 60-69
- [37] Chaplin G, Pugsley T. Application of electrical capacitance tomography to the fluidized bed drying of pharmaceutical granule [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**: 7022-7033
- [38] Diks C, van Zwet W R, Takens F, De Goede J. Detecting differences between delay vector distributions [J]. *Physical Review E*, 1996, **53**: 2169-2176
- [39] van Ommen J R, Coppens M C, van Den Bleek C M. Early warning of agglomeration in fluidized beds by attractor comparison [J]. *AIChE Journal*, 2000, **46**: 2183-2197
- [40] van Ommen J R. Monitoring fluidized bed hydrodynamics [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2001
- [41] Makkawi Y, Ocone R. Mass transfer coefficient for drying of moist particulate in a bubbling fluidized bed [J]. *Chem. Eng. Technol.*, 2009, **32** (1): 64-72
- [42] Chaplin G. Monitoring fluidized bed dryer hydrodynamics using pressure fluctuations and electrical capacitance tomography [D]. Canada: University of Brunswick, 2001
- [43] Tanfara H, Pugsley T, Winters C. Effect of particle size distribution on local voidage in a bench-scale conical fluidized bed dryer [J]. *Drying Technology*, 2002, **20**: 1273-1289
- [44] 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**: 220-234
- [45] Wang H G, Yang W Q, Senior P, Raghavan R S, Duncan S R. Investigation of batch fluidized-bed drying by mathematical modeling, CFD simulation and ECT measurement [J]. *AIChE Journal*, 2008, **54**: 427-443
- [46] Wang H G, Senior P R, Mann R, Yang W Q. Online measurement and control of solids moisture in fluidised bed dryers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, **64**: 2893-2902
- [47] Pugsley T, Tanfara H, Malcus S, Cuib H, Chaouki J, Winters C. Verification of fluidized bed electrical capacitance tomography measurements with a fibre optic probe [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, **58**: 3923-3934
- [48] Chandrasekera T C, Wang A, Holland D J, Marashdeh Q, Pore M, Wang F, Sederman A J, Fan L S, Gladden L F, Dennis J S. A comparison of magnetic resonance imaging and electrical capacitance tomography: an air jet through a bed of particles [J]. *Powder Technology*, 2012, **227**: 86-95
- [49] Marashdeh Q, Warsito W, Fan L S, Teixeira F. Dual imaging modality of granular flow based on ECT sensors [J]. *Granular Matter*, 2008, **10**: 75-80
- [50] Zhang W B, Cheng Y P, Wang C, Yang W Q, Wang C H. Investigation on hydrodynamics of triple-bed combined circulating fluidized bed using electrostatic sensor and electrical capacitance tomography [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013, **52**: 11198-11207