

近期多相流过程层析成像技术的发展

张修刚, 王 栋, 林宗虎

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 多相流过程层析成像技术对于深入揭示多相流动的基本规律, 推动多相流理论的发展和工程应用具有重要的意义。文中介绍了近年来 X 射线、 γ 射线、超声波、电阻、电容及网状电极等几类过程层析成像技术在多相流参数检测中的应用和发展, 分析了图像重建、传感器的设计及选择和实时性等关键问题, 最后对其应用前景和发展趋势做了展望。

关键词: 过程层析成像; 两相流/多相流; 图像重建; 在线测量

中图分类号: O359 文献标识码: A

1 引言

多相流动广泛存在于动力、石油、化工、核能、食品和医学等多个领域。与单相流动相比, 多相流动相间存在着界面效应和相间速度, 其流动特性更加复杂多变, 因此要建立可靠的多相流动力学模型, 并对多相流动过程进行预测、设计及控制, 必须解决多相流动过程中的参数检测问题。

过程层析成像技术是从医学 CT 技术发展起来的, 以多相流为主要研究对象, 并对多相流中的过程参数在线实时检测技术。自 20 世纪 80 年代中期起, 过程层析成像技术开始应用于多相流参数的检测, 国内外研究者为此做了大量的工作。所有的研究表

明, 在多相流参数检测中, 过程层析成像技术可以获得多相流体的二维/三维的时空局部微观分布信息, 这为流动特性复杂多变、常规方法检测参数难度较大的多相流领域提供了一条十分有效的在线测量和监测途径, 对于深入揭示多相流动的基本规律, 推动多相流理论的发展和工程应用具有重要的意义, 是目前多相流参数检测技术研究发展的前沿和趋势之一^[1~4]。

本文结合国内外研究者应用过程层析成像技术多相流参数检测方面所做的工作, 对其近期发展现状和前景进行分析和综合评述。

2 过程层析成像技术多相流测量中的应用研究

过程层析成像技术多相流参数检测中用途广泛, 具体表现在:

- (1) 提供被测流体在流体管道某一横截面的实时图像, 用于识别与判断流型及确定相间界面;
- (2) 用于确定多相流体各相组分在容器或管道中的局部浓度分布, 进一步处理分析可得到各相组分的总浓度;
- (3) 确定离散相的颗粒尺寸

和运动轨迹等微尺度参数;

(4) 将过程层析成像技术与相关流速测量技术相结合, 可实现对多相流体的总流量、各相流量的测量及流体在管道横截面上速度分布的实时测量。

结合国内外研究者在过程层析成像技术领域所做的工作, 本文将过程层析成像技术划分为两类: 一是具有图像重建运算的过程层析成像技术; 二是无图像重建运算的过程层析成像技术。

2.1 需要图像重建运算的过程层析成像技术

这类过程层析成像系统如图 1 所示, 一般由敏感器件的空间阵列、信号处理及数据采集单元、图像重建、解释及分析单元、图像实时成像单元等 4 部分组成。

工作原理为: 安装在管道或容器某个截面上的敏感器空间阵列, 对被测物场形成二维/三维的分布状况的投影信息, 并输出相应信号。这种信号经过解调、滤波、A/D 转换等信号处理后, 输入计算机数据采集, 数据采集的速度必须足够快, 以保证一次完整的扫描时间间隔内多相流体的各相组分分布基本上无变化。经处理后的数据信号输入到图像重建单元, 运用反投影、迭代等重建算法, 对管道或容器横截面的相

分布等进行空间定位。图像解释、分析可视为对重建图像进行翻译的过程,根据图像重建后获得的有关管截面或容器各局部区域的原始信息,通过相应的数学处理和解析,给出各种检测的参数值或表征被测流体各相分布状况的数字图像各像素的灰度值。最后把经过图像重建、解释及分析后的信息输入进实时图像成像单元,在计算机显示屏上显示出被测管道或容器截面的相分布的实时图像、被测物场特性参数等。

根据敏感器件的测量原理,过程层析成像技术主要有核子(X射线、 γ 射线、中子射线、正电子、光子)、超声波、电学(电阻、电容、电磁感应)、光学及核磁共振过程层析成像技术等几类十余种。各种不同的过程层析成像技术的选择基于时间及空间分辨率的考虑以满足多相流参数检测的需要^[3]。

2.1.1 核子过程层析成像技术

核子过程层析成像技术主要有X射线、 γ 射线、中子射线、正电子及光子几种过程层析成像技术。

X射线、 γ 射线过程层析成像是最早发展起来的层析成像技术,也是理论上最成熟和完备的层析成像技术,它们是医学CT技术在多相流参数检测领域中直接应用和延伸,其检测原理是依据射线穿透被测介质时产生的衰减作用来进行检测。有关X射线、 γ 射线过程层析成像技术的文献主要有:对油水混合物通过多孔介质渗流运动的有关特性研究^[3];气固流化床动力学的研究和参数检测^[3];填充床内多相流动特性及液流柱的数目及尺寸研究^[5];应用X射线对多相流的测量和可视化研究^[5];多孔介质中两相流的相对渗透性测量^[7]及文

献[8—10]等。

相比X射线、 γ 射线过程层析成像技术,中子射线^[4]、正电子发射^[4,11]及光子^[4]过程层析成像应用较少,国内外只有零星报道。

核子层析成像技术共同之处是:成本较高,经济性差;由于在投影数据的获取过程中涉及到光子的记数等,因此限制了实时性,通常映像时间在0.1~10s之间;系统采用的是放射源,安全性差,而且使用、管理、维护要求条件苛刻。但与电学等其它过程层析成像技术相比,图像重建运算较为简单,成像精度较高,目前多应用于多相流微尺度特性参数的研究。

2.1.2 超声波过程层析成像技术

对超声波过程层析成像开始于20世纪80年代,是目前广泛研究的一种过程层析成像技术,它以超声波作为扫描源,利用被测介质对入射声波的吸收和散射效应所引起的声波衰减、声波在不均匀介质中传播,其速度随介质不同而发生的变化或不均匀介质对散射声波的幅值和相位的影响的原理,从不同角度和方向扫描以获取管道或容器横截面的实时图像。

这种过程层析成像系统有反射式、衍射式及透射式三种形式,其中反射式和透射式应用较多。Weigand等人在1989年提出反射式的超声波过程层析成像系统并用单节及三节的扇形超声波传感

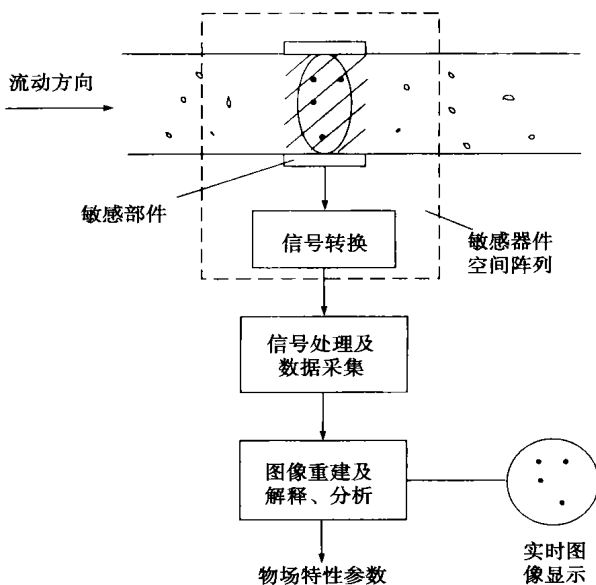


图1 过程层析图像技术系统构成

器对气液两相流进行实时成像及参数测量^[12]。国内,天津大学电力与自动化系利用透射式超声波过程层析成像技术在气液两相流方面作了大量工作,如气液两相泡状流体的分布的实时监测、气液两相流流型机理的判断与识别及气液两相流流动过程的在线监测等^[13—15]。G J Brown等人对透射式超声波过程层析成像技术监测气力输送管线中气固两相流体的分布做了详细介绍^[16]。

由于超声波与电磁波、光波等相比具有在介质中传播速度慢的固有特性,因而在应用过程中存在着实时性的问题,系统难以对高速多相流体进行实时测量,而且超声波灵敏度分布场易受多相介质分布的影响。此外,传统的反投影算法在成像质量上有待进一步提高和改进,为了改善传统的反投影算法所造成的图像失真,一般采用二进制滤波逻辑反投影算法。从另一方面来说,超声波过程层析成像技术是一种非辐射性技术、安全性高、成本相对

较低的测量方法, 而且从原理上也适用于大多数多相流参数的检测领域。从近年来超声波过程层析成像技术在多相流领域的应用发展来看, 是一种很有发展前景的过程层析成像技术, 工业应用前景看好。

2.1.3 电学过程层析成像技术

电学过程层析成像主要包括电阻过程层析成像、电容过程层析成像及电磁感应过程层析成像技术三类。

有关电磁感应过程层析成像技术在多相流参数检测领域应用的文献报道相对较少^[19], 这里着重介绍电阻特别是电容过程层析成像技术。

电阻过程层析成像技术(ERT)是 20 世纪 80 年代末期发展起来的并广泛应用的一项过程层析成像技术, 其测量的物理基础是多相流体不同组分具有不同的电导率, 判断出敏感场中的电导率分布便可获取多相流体中的相分布。目前统一采用的工作方式与交流电流激励、电压测量。这种过程层析成像技术在多相流流型辨识及参数在线测量方面的应用引人瞩目, 基于 ERT 技术提出了流型识别的基本方法, 并针对气液两相流及油水两相流, 通过图像重建和数据分析实现了流型识别^[18~20]。Wang 等人利用 ERT 技术对气液两相流体在搅拌容器中的混合过程进行了测量^[21]; 其他学者进行了基于电阻层析成像技术的两相流流速等参数的测量^[22~23]。

电容过程层析成像也是较早开始研究并应用的一种过程层析成像技术, 它的测量原理是在管道或容器中流动的多相流体的不同组分具有不同的介电常数, 利用布

置在电容传感器空间阵列的不同电极对获取反映整个管子或容器截面的介电常数的变化, 再采用某种重建算法, 获取多相流体不同组分的含量及分布信息等。

典型的电容过程层析成像系统由三部分组成: 传感器系统、数据采集系统及成像计算机, 如图 2 所示。电容传感器空间阵列将被测管道中介质的相分布转化为电极间的电容; 数据采集系统首先通过电容/电压转换电路将电容转换为直流电压信号, 此信号经 A/D 转换变为数字量, 并发往计算机, 经计算机处理后转为一定的投影数据, 并由图像重建单元重建出图像并显示出来。

电容电极沿绝缘层外壁周向均匀分布, 为了防止外界电磁干扰, 通常设置屏蔽层。目前常用的电极数目 N 一般为 6~16 个, 增加电极数目, 可获得更多扫描数据, 从而提高重建图像质量, 但同时会带来信噪比降低和边缘效应增大的问题。扫描数据的增多, 对数据采集和图像重建算法要求更高, 以满足实时性的要求。针对目前电容过程层析成像技术, 所运用的图像重建算法有: 线性反投影法、迭代算法、神经网络法、查表法及基于模型的摩尔算法等。

1988 年英国曼彻斯特大学理工学院在 M. S. Beck 教授的带领下率先研制出 8 电极的电容过程层析成像系统, 采用简单的

反投影算法, 用水和沙分别模拟两相流静态模型, 并取得了成功; 国内天津大学和清华大学最早开始电容过程层析成像技术的研究。经过十余年的发展, 电容层析成像技术在多相流参数检测领域取得了令人鼓舞的成果。气固两相流方面: K L Ostrowski 利用电容过程层析成像技术对气力输送过程中的气固两相流型进行了识别研究^[24]; T dyakowski 等人总结了电容过程层析成像技术在气力输送及鼓泡流态化技术中的气固两相流测量的应用; 夏靖波等人利用空气和介电常数约 3.2、粒径约 3 mm 的塑料颗粒为实验材料, 基于神经网络图像重建算法, 利用电容过程层析成像技术对气固两相流的层流和环状流进行了实验识别, 达到了较理想的效果^[24~26]。气液两相流方面: 基于交流法用以监测柴油和天然气两相流的流动状态, 分别利用 12 和 16 电极电容传感器空间阵列对滴流床气液两相流型的瞬态层析成像; 电容过程层析成像技术在油气水、气液固三相流参数检测方面也有文献报

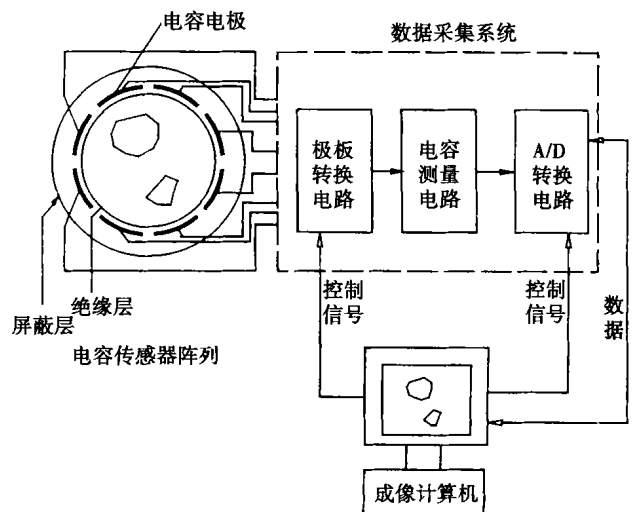


图 2 电容过程层析成像系统构成

道^[28~34]。

电阻与电容过程层析成像技术都有成本低、实时性好、无辐射、安全性强、操作方便、非侵入测量及应用广泛的优点,在多相流参数检测领域得到了广泛的应用,特别是电容层析成像被认为是最有前途的过程层析成像技术,成为过程层析成像技术应用和发展的主流^[35]。

除了以上介绍的过程层析成像技术外,国内外也有光学、核磁共振层析成像技术的报道^[36~38]。

2.2 无图像重建运算的过程层析成像技术

无须图像重建运算的过程层析成像技术是近几年刚刚出现的一种新型的过程层析成像技术,1998年 H-M Prasser 在 Irvin D Johnson^[39]发明的原油含水仪的基础上利用网状电导传感器阵列、并用直接的电压采集信号代替原来的二进制记数实现了无图像重建的过程层析成像,其过程层析成像系统和时钟控制及信号采集方法如图 3、图 4 所示。

网状电极传感器由发送电极和接收电极组成,他们是两个相互垂直的、靠得很近的网状电极平

面。发送电极和接收电极的交错点为测量敏感点,通过测量分布于整个管道横截面的敏感测点电导率的变化来确定各点处介质的分布,进行实时成像。这种系统结合了电导探针及电学过程层析成像系统的优点,即实现了对整个管道横截面的二维精确测量,又无须图像重建进行实时成像。由于网格电极布置在管道内部实现接触式测量,因此对网格电极的导线要求尽可能细,从而尽可能小的干扰流场,导线的张力要保证两平面上的电极不会因流场的作用而直接接触。

H M Prasser 对此做了大量的工作,先后利用 16×16 的网格电极对垂直管中的气液两相流流型及流型转变进行了识别并对空隙率进行了测量,时间分辨率为 1024 帧/s^[40];对气液两相流在垂直管中流动时气泡尺寸进行了实时测量,分辨率为 1 200 帧/s^[41];对气液两相流在垂直管线流动时,气泡尺寸进行了实时测量,并确定了气泡在管道横截面的分布及在管线中演化方式,时间分辨率为 1 200 帧/s,空间分辨率 2~3 mm^[42]。目前,时间分辨率已超过 10 000 帧/s。S

Richter 也利用这种网格状的过程层析成像技术,对矩形管道中泡状流流动特性进行了研究^[43]。

H M Prasser 提供了一种新的过程层析成像技术的思路,启发我们可以利用多相流体中不同组分所具有不同的热传导、折射系数、介电常数、电导及电解特性研发出新的无须图像重建的过程层析成像系统。西安交通大学王栋、张修刚受 Prasser 和 Reinecke 新型电导思想的启发,突破层析成像的“非介入”既定模式,采用与流体接触的蛛网式电容敏感阵列有效克服制约层析成像的软场问题,提出了一种两相流高速层析成像系统,即蛛网式两相流高速层析成像方法。目前该研究项目已进行过部分模拟实验,完全具备开展该项研究的基础和条件。此项研究申请了高等学校全国优秀博士学位论文作者的专项基金,同时正在申请国家专利。

3 过程层析成像技术应用的几个关键问题

3.1 图像重建及重建算法

对于需要图像重建的过程层析成像技术,图像重建是关键的一

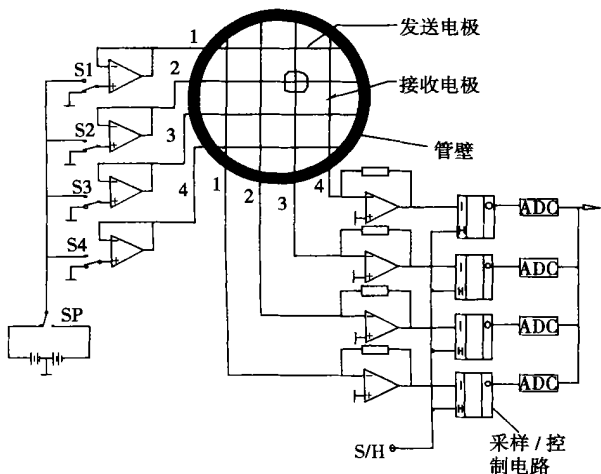


图 3 网状电极过程层析成像系统(H M Prasser)

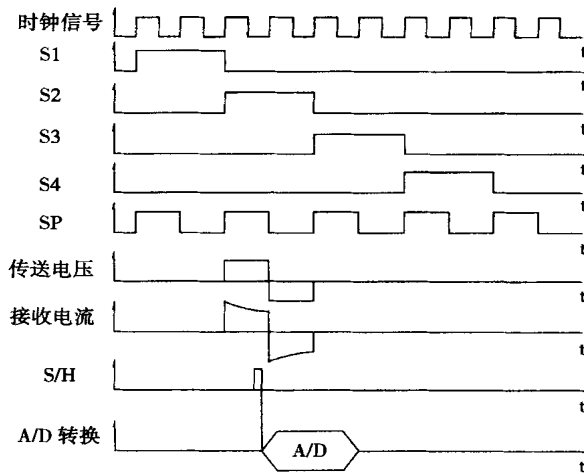


图 4 信号控制及信号采集方法

步,通过一定的图像重建算法完成由投影数据到图像这一问题。图像重建运算的优劣不仅关系到成像的质量,而且影响到成像的实时性。1999年,在波士顿召开的第一届世界工业过程层析成像技术会议上发表的90篇论文中,有22篇论及图像重建运算,表明了图像重建的重要性。国内外的不少研究者针对不同的过程层析成像技术,开展了大量的有关图像重建运算工作^[44~51]。

3.2 敏感器件的设计与选择

敏感器件即传感器是任何过程层析成像系统的核心,它的设计和选择需要考虑如下因素:与被测管道、设备、装置的几何形状、尺寸的匹配;对管道及设备中多相流体的流动状态及流体性质、工作环境及条件的适应;安全性及维修难易;使用目的、分辨率及测量灵敏度(是实验研究、设备优化,还是过程控制)等。

3.3 实时性问题

多相流动体系是一个快速动态系统,流体的流动结构和形态及流体流动特性变化迅速,因此要求过程层析成像系统必须具有快速的数据采集、图像重建、图像解释及分析和图像成像速度从而达到对多相流参数在线检测和监测的目的。

4 结束语

通过对各种过程层析成像技术的分析,一个完善的过程层析成像系统应用在多相流参数检测中必须具有成本低、应用范围广、实时性强、系统工作可靠、安全及便于维护等特点。过程层析成像技术对多相流体的二维/三维的时空局部的微观分布信息获取,为我们开展两相流/多相流研究

提供了强有力的实验手段,同时为在多相流体的输送、处理和反应等复杂的生产过程中实现实时监测、控制及安全高效的运行创造了条件。随着电子技术、计算机技术、信号处理和图像处理技术的不断发展,过程层析成像技术必将会在多相流参数检测领域取得更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 林宗虎,王树众,王 栋.气液两相流和沸腾传热[M].西安:西安交通大学出版社,2003.420-425.
- [2] 李海青.两相流参数检测及应用[M].杭州:浙江大学出版社,1991.330-341.
- [3] 黄志尧,金宁德,李海青.层析成像技术在多相流参数检测中的应用[J].化学反应工程与工艺,1996,12(4):395-405.
- [4] DYAKOWSKI T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement[J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7(3): 343-353.
- [5] TOYE D, MARCHOT P, CRINE M, et al. Modeling of multiphase flow in packed beds by computer-assisted X-ray tomography[J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7(3): 436-443.
- [6] HORI K, FUJIMOTO T, KAWANISHI K, et al. Advanced high speed X-ray CT scanner for measurement and visualization of multiphase flow[A]. In: *OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurement Techniques* [C], USA: Santa Barbara, 1997. 17-20.
- [7] SCHEMBRE J M, KOVSCEK A R. A technique for measuring two phase relative permeability in porous media via X-ray CT measurements [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2003, 39(2): 159-174.
- [8] SHOLLENBERGER K A, TORCZYNSKI J R, ADKINS D R, et al. Gamma-densitometry tomography gas holdup spatial distribution in industrial-scale bubble columns[J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(13): 2037-2048.
- [9] CAROLYN E SCHMIT, DWIGHT B CARRIMEL, R BRUCE ELBRIGHT. The experimental application of X-ray tomography

to a vapor-liquid contactor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(11): 3431-3441.

- [10] ABDENOUR KEMOUN, BOON CHENG ONG, PUNEET GUPTA, et al. Gas holdup in bubble columns at elevated pressure via computed tomography[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(5): 929-946.
- [11] PARKER D J, MCNEILL P A. Positron emission tomography for process applications[J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7(3): 287-296.
- [12] WEIGAND F, HOLYLYE B S. Simulations for parallel processing of ultrasound reflection-mode tomography with applications to two-phase flow measurement[J]. *IEEE Trans. Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 1989, 36(3): 652-660.
- [13] 徐立军,许苓安.超声层析成像监测气液两相泡状流体分布[J].天津大学学报,1995,28(2):129-135.
- [14] XU LI-JUN, XU LING-AN. Gas/liquid two-phase flow regime identification by ultrasonic tomography [J]. *Flow Meas Instrum*, 1997, 8(3/4): 145-155.
- [15] XU LI-JUN, HAN YONG-TAO, XU LING-AN, et al. Application of ultrasound tomography to monitoring air/gas flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(13): 2171-2183.
- [16] BROWN G J, REILLY D, MILLIS D. Development of an ultrasound tomography system for application in pneumatic conveying [J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7(3): 396-405.
- [17] PEYTON A J, YU Z Z, LYON G, et al. An overview of electromagnetic inductance tomography: description of three different systems [J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7(1): 261-271.
- [18] 董 峰,徐立军,刘小平,等.用电阻层析成像技术实现两相流流型识别[J].仪器仪表学报,2001,22(3):416-417.
- [19] MA YI-XIN, ZHENG ZHI-CHU, XU LING-AN, et al. Application of electrical resistance tomography system to monitor gas/liquid two-phase flow in a horizontal pipe [J]. *Flow Meas Instrum*, 2001, 12(2): 259-265.
- [20] DONG FENG, LIU XIAO-PING, DENG

- XIANG, et al. Identification of two-phase flow regimes in horizontal, inclined and vertical pipes [J]. **Meas Sci Technol** 2001, **12**(8): 1069—1075.
- [21] WANG M, DORWARD A, VLAEV D. Measurements of gas-liquid mixing in a stirred vessel using electrical resistance tomography [J]. **Chemical Engineering Science**, 2000, **77**(1): 93—98.
- [22] 邓 湘, 董 峰, 刘小平, 等. 基于电阻层析成像技术的两相流流速测量系统 [J]. **自动化仪表**, 2002 **23**(11): 8—10.
- [23] DONG F, JIANG Z X, QIAO X T, et al. Application of electrical resistance tomography to two-phase pipe flow parameters measurement [J]. **Flow Meas Instrum**, 2003, **14**(1): 183—192.
- [24] OSTROWSKI K L, LUKES P, BENNETT M A, et al. Application of capacitance electrical tomography for on-line and off-line analysis of flow pattern in horizontal pipeline of pneumatic conveyer [J]. **Chemical Engineering Journal** 2000, **77**(1): 42—50.
- [25] 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.
- [26] 夏靖波, 夏军利, 白 鸥. BP 神经网络在电容成像流型识别中的应用 [J]. **沈阳工业大学学报**, 1999, **21**(3): 262—264.
- [27] ROBERT B WHITE. Using electrical capacitance tomography to monitor gas voids in a packed bed of solids [J]. **Meas Sci Technol** 2002, **13**(12): 1842—1847.
- [28] 刘 石, 徐建中. 粉粒体两相流的电容层析成像测量 [J]. **工程热物理学报**, 2002, **23**(1): 94—98.
- [29] 谢代梁, 王保梁, 李海青, 等. 电容层析成像流型可视化系统研究 [J]. **浙江大学学报**, 2002, **36**(1): 22—25.
- [30] REINECKE N, MEWES D. Multielectrode capacitance sensors for the visualization of transient two-phase flows [J]. **Experimental Thermal and Fluid Science** 1997, **15**(3): 253—266.
- [31] 赵进创, 付文利, 张锦雄, 等. 电容层析成像技术在油/气两相流可视化监测中应用 [J]. **计算机测量与控制**, 2003, **11**(1): 20—22.
- [32] BENNETT M A, WEST R M, LUKE S P, et al. Measurement and analysis of flows in a gas-liquid column reactor [J]. **Chemical Engineering Science**, 1999, **54**(21): 5003—5012.
- [33] MWAMBELA A J, JOHANSEN G A. Multi phase flow component volume fraction measurement: experimental evaluation of entropic thresholding methods using an electrical capacitance tomography system [J]. **Meas Sci Technol** 2001, **12**(8): 1092—1101.
- [34] WARSITO W, FAN S. Measurement of real-time flow structures in gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems using electrical capacitance tomography [J]. **Chemical Engineering Science** 2001, **56**(22): 6455—6462.
- [35] 王 兴, 颜 华. 电容层析成像技术及发展现状 [J]. **沈阳工业大学学报**, 2001, **23**(6): 497—500.
- [36] 曾 楠, 廖延彪, 赖淑蓉. 二维流场光学层析成像研究 [J]. **激光杂志**, 2002, **23**(5): 30—31.
- [37] ARIUSZ R RZASA, ANDRZEY P ASKOWSKI. Application of optical tomography for measurements of aeration parameters in large water tanks [J]. **Meas Sci Technol**, 2003, **14**(1): 199—204.
- [38] LYNN F GLADDEN, PAUL ALEXANDER. Applications of nuclear magnetic resonance imaging in process engineering [J]. **Meas Sci Technol**, 1996, **7**(3): 423—435.
- [39] IRVIN D JOHNSON. method and apparatus for measuring water in crude oil [R]. United States Patent, 1987, NO. 4644263.
- [40] PRASSER H M, BÖTGER A. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows [J]. **Flow Measurement and Instrumentation** 1998, **9**(2): 111—119.
- [41] PRASSER H M, SCHOLZ D, ZIPPE C. Bubble size measurement using wire-mesh sensors [J]. **Flow Measurement and Instrumentation** 2001, **12**(4): 299—312.
- [42] PRASSER H M, KREPPER E, LUCAS D. Evolution of the two-phase flow in a vertical tube—decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors [J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2002, **41**(1): 17—28.
- [43] RICHTERS, ARITOMI M, PRASSER H M. Approach towards spatial phase reconstruction in transient bubbly flow using a wire-mesh sensor [J]. **Int J of Heat and Mass Transfer**, 2002 **45**(5): 1063—1075.
- [44] KYUNG-HO CHO, SIN KIM, YOON-JOON LEE. A fast EIT image reconstruction method for the two-phase flow visualization [J]. **Int Comm Heat Mass Transfer**, 1999, **26**(5): 637—645.
- [45] A FILIZ BAYTAS, MELIH GECKINLI. An alternative approach to direct fourier reconstruction in parallel-beam tomography [J]. **Meas Sci Technol**, 1996 **7**(4): 556—563.
- [46] PLAYER M A, J VAN WEERELD, HUTCHISON J M S, et al. An electrical impedance tomography algorithm with well-defined spectral properties [J]. **Meas Sci Technol**, 1999, **10**(1): 9—14.
- [47] ZHAO JINCHUANG, FU WENLI, LI TAOSHEN, et al. An image reconstruction algorithm based on a revised regularization method for electrical capacitance tomography [J]. **Meas Sci Technol**, 2002 **13**(4): 638—640.
- [48] YANG W Q, SPINK D M, YORK T A, et al. An image reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical capacitance tomography [J]. **Meas Sci Technol**, 1999, **10**(11): 1065—1069.
- [49] WARSITO W, FAN L S. Neural network based multi-criterion optimization image reconstruction technique for imaging two and three phase flow systems using electrical capacitance tomography [J]. **Meas Sci Technol**, 2001, **12**(12): 2198—2210.
- [50] YUDAYA SIVATHANU, JONGMOOK LIM, RONY JOSEPH. Statistical absorption tomography for turbulent flows [J]. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, 2001, **68**(5): 611—623.
- [51] YANG W Q, PENG LIHUI. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography [J]. **Meas Sci Technol** 2003, **14**(1): 1—13.

近期多相流过程层析成像技术的发展 = **Recent Developments in Process Tomography for Multi-phase Flows** [刊, 汉] / ZHANG Xiu-gang, WANG Dong, LIN Zong-hu (College of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 221 ~ 226

Process tomography for multi-phase flows plays a major role in the exhaustive exposition of multi-phase flow basic laws, promoting the development of multi-phase flow theories and their engineering applications. The authors give a brief account of the use and development of several types of tomographic techniques as represented by X and γ rays, ultrasonic waves, electric resistance, capacitance and mesh electrodes in the detection and measurement of multi-phase flow parameters. An analysis is given of a variety of key issues, such as image reconstruction, the design and selection of sensors, real-time character, etc. In conclusion, application prospects and development trends of the process tomography are forecast. **Key words:** process tomography, two-phase flow, multi-phase flow, image reconstruction, on-line measurement

电除尘器阴极收尘潜力的研究 = **A Study of the Dust Removal Potential by the Cathode of an Electrostatic Precipitator** [刊, 汉] / HU Man-yin, GAO Wei-ying, BAI Zheng-guang, et al (Department of Environmental Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 227 ~ 229

A preliminary analysis and an experimental study were performed of the various functions of the cathode of an electrostatic precipitator. They include: corona discharge, the establishment of a high field intensity, dust collection, the reduction of secondary dust-emission loss, the weakening and elimination of counter-corona harmful effects as well as the prevention of low voltage and high current-related unfavorable operations. It is suggested that cathode structure improvement can lead to a reduction of the cathode secondary dust-emission loss and the enhancement of the cathode dust-collection effectiveness as well as to a suppression of counter-corona. Meanwhile, it is also conducive to a stable operation of the electrostatic precipitator under the condition of a high voltage and relatively low current, thus achieving the aim of high dust-removal efficiency. The resolution of the above-mentioned issues can provide helpful reference data for the design, modification and operation of electrostatic precipitators. **Key words:** electrostatic precipitator, dust removal by a cathode, cathode secondary dust-emission

一种新的湿法脱硫强制氧化技术 = **New Technology of Forced Oxidation for a Wet Flue-gas Desulfurization System** [刊, 汉] / TIAN Feng-guo, ZHANG Ming-chuan (College of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), MA Chun-yuan (College of Energy & Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061), WU Jiang (Materials Characterization Center under the Western Kentucky University, KY 42101, USA) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 230 ~ 233

Forced oxidation plays a key role in the prevention of agglomeration and blockage in a wet flue-gas desulfurization (WFGD) system and the reduction of secondary pollution caused by desulfurization waste dregs. A jet-flow aeration technique is proposed for use in the forced oxidation process of limestone/gypsum WFGD system. Moreover, a theoretical analysis is conducted of the gas/liquid interphase mass-transfer features of the jet-flow aeration forced-oxidation process by the use of a dual film theory. The results of the analysis indicate that a jet-flow aerator as a kind of mixing device for the chemical reaction mass-transfer of gas/liquid two-phase media can give full play to its intensive mixing action, thus enhancing energy comprehensive utilization rate. The calculation results of the energy consumption of a WFGD project show that the adoption of the jet-flow aeration mode has resulted in energy-savings of more than 20%. The reduction of desulfurization cost is conducive to promoting the domestic manufacture of key desulfurization equipment. **Key words:** wet flue-gas desulfurization, forced-oxidation process, jet-flow aeration

微型鼓泡床中石灰石溶解特性的实验研究 = **Experimental Investigation of Limestone Dissolution Characteristics in a Micro-sized Bubbling Bed** [刊, 汉] / SHI Zheng-hai, ZHAO Cai-hong, ZHOU Qu-lan, et al (College of En-