

# 利用电容层析测量煤粉浓度的实验研究

孙 猛,李志宏,姜 凡,刘 石

(中国科学院工程热物理研究所,北京 100080)

**摘 要:** 锅炉燃烧过程中,准确测量风管中的煤粉浓度并指导调节对锅炉的安全、经济运行非常重要。采用电容层析成像技术,对常温下稀相气力输送的固体浓度进行了测试研究。为克服电容传感器敏感场的不均匀性对成像造成的影响,实验系统中装置了一旋风分离装置,通过旋风分离作用将固体颗粒主要集中在壁面区域,传感器电极布置在分离器直管上。这种测试方法的优点在于不破坏原有系统的运行特性,属于非侵入式、在线的快速测试技术。通过建立实验台及相应的在线测量系统,实验结果表明该法是可行的。

**关 键 词:** 气力输送;电容层析成像;流量测量;气固两相流

中图分类号: TQ533; TK313 文献标识码: A

## 引 言

在电力、冶金、化工、食品等工业部门中,广泛应用管道气力输送技术来输送煤粉、矿石、塑料颗粒、盐类以及面粉等,这些都属于气固两相流的范畴。在这当中,气固两相流质量流量的测量和控制是一个急需解决又长期未能很好解决的难题。例如,在冶金和电力工业中,高炉和锅炉的煤粉喷吹是一项可提高燃烧效率,大量节约能源的重大技术措施。目前由于还不能在线实时地检测各喷管内高压气流所携带煤粉的质量流量,整个喷吹系统难以维持在合理的工况下运行,煤粉在高炉内的最佳燃烧就无法实现,这是多年来阻碍高炉和锅炉喷吹技术获得最佳经济效益的一个关键环节。

由于气固两相流的复杂性,一次风风速及煤粉浓度的测量并非易事。许多研究者对气固两相流中颗粒浓度的测量提出了许多方法,如热平衡法、激光法、传热法、电容法等等<sup>[1-9]</sup>。每种测量方法都有其优点,但不可避免地存在一定的缺点:热平衡法只适用于煤粉和热风有较大温差的中间储仓式热风送粉系统,对于煤粉和热风的混合长度的确定也存在一定的困难;能量法的比例系数中包含了众多难以确

定的复杂因素,如颗粒群摩擦系数、速度比和悬浮速度等,因此一般仅应用于气力输送系统设计的定性分析及工程计算;传热法虽然具有对煤粉变化反应灵敏、受其它因素干扰小、对现场管道改动小和测试仪表造价低等优点,但数学关系式或图表曲线的确定存在一定的困难。另外,电容法在实际应用中存在两个问题:(1)两相流动过程十分复杂,检测场内煤粉分布不均匀,流型变化快;(2)电容传感器检测场属于“软场”,有其固有的灵敏度分布不均匀性问题,使测量结果不仅与煤粉浓度有关,而且受煤粉分布及流型变化的影响很大,测量误差较大。本文主要是对电容层析成像技术在稀相气力输送煤粉浓度上的测量进行了研究与改进,得出了可靠的结果。

## 1 电容层析成像测量原理

电容层析成像技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一项新的浓度测量技术<sup>[7]</sup>,开始应用于气固、气液两相流测量中<sup>[8-10]</sup>,它不会对流场产生干扰,不受固体浓度、加速度、透明度的限制,是一种非侵入式、快速测量技术。

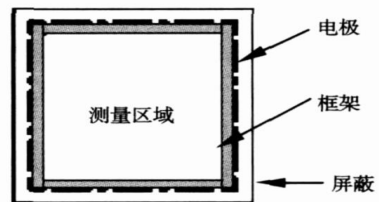


图 1 传感器结构示意图

电容层析成像原理是利用一组电极从外部环绕被测区域,利用被测区域内物质分布而导致的各电极之间的电容关系,由测得的电容值重现被测区域内的物质分布。图 1 是一个方形电容层析传感器示

收稿日期: 2006-12-06; 修订日期: 2007-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40501017, 60672151); 国家自然科学基金重点基金资助项目(60532020)

作者简介: 孙 猛(1980-)男,江苏沛县人,中国科学院博士研究生

意图,其中框架包围着被测区域,由仪器巡回测量各个电极板之间的电容。由于物质分布的变化导致测量区域内电势分布的变化,进而导致各个测量电极之间电容信号的相应变化。而通过数学的方法,则可以将此信号的变化反推出物质的分布情况,这一过程称为电容层析成像的逆过程,最简单的成像过程是线性逆反推(Linear Back Projection, LBP),计算公式为:

$$G = S^T C \quad (1)$$

式中: $C$ — $m$  阶电容向量; $S$ — $m \times n$  阶矩阵,反映电容值变化受物质分布的影响程度<sup>[11]</sup>;线性逆反推算法虽然快,但是成像质量差;迭代法虽然成像质量好但耗时过长,多用来进行离线分析。本文采用文献[12]提出的预迭代的方法,大致思想如下:

$$D_{k+1} = (I - \alpha_k S^T S) D_k + \alpha_k S^T G \quad (2)$$

( $k = 1, 2, \dots, z$ )

$$G = D_z C \quad (3)$$

算法分两步进行,首先根据式(2)离线进行迭代计算得出一系数矩阵  $D_z$ ,然后用此系数矩阵进行在线成像测量,如同 LBP 法,这样既提高了成像质量又不影响成像的速度。 $G$  为  $n$  阶图像向量。其中  $m$  为测量的电容个数,12 电极为 66,8 电极为 28; $n$  为测量区域的像素个数。文中使用 8 电极圆形传感器,像素个数为  $32 \times 32$ 。电容层析成像技术的缺点是其测量场是一软场,受测量介质的影响,而且敏感场矩阵也不均匀,在靠近电极处敏感性比较强,而在中心区域敏感性比较差,因此在实验过程中设计了一个旋风分离装置,电极布置在旋风分离器上,通过旋风分离作用固体颗粒靠近壁面,从而提高了测量的精度。

## 2 实验系统介绍及实验研究

实验系统如图 2 所示,空气通过抽风机的抽吸作用进入管道,物料从贮煤仓由螺杆式给粉机送入

煤粉混合器,与空气混合后形成气固两相流,然后经旋流作用进入实验段的竖直管,最后进入除尘系统。物料选用电厂粉煤灰,固体粉粒体平均粒径为  $50 \mu\text{m}$ ,物质密度为  $2350 \text{ kg/m}^3$ ,携带粉粒体的气体为常温空气,进气量由流量计计量,螺杆式给粉机转速由可调转速电机控制,以控制不同的给料量,与空气在混合段混合后进入旋流浓缩装置,ECT 传感装置系统就布置在旋流浓缩装置的直管上,最后混合流体经旋风分离器分离后粉粒体进入收集箱。

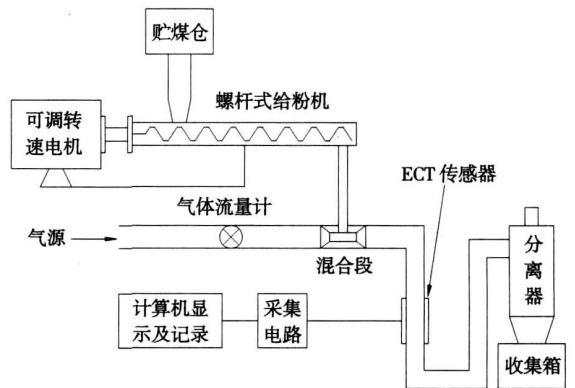


图 2 ECT 测量系统简图

图 3 列出了同一种煤粉浓度下 6 个不同时刻的图像。尽管试验数据存在波动性,不同时刻的数据所成的图像也略有差异,但在总体上可以看到粉粒体在横截面上的分布的共同特征:浓度在壁面上达到最高,向中心逐渐降低,并且不是整个周向平均分布。这样固体颗粒主要集中在壁面附近,而电容层析成像的敏感场在周边区域又很强,而且对于圆形管道来讲敏感场是沿周边均匀分布的,对于电容层析成像有很大的益处,进而提高了灰度值的计算精度。通过计算灰度值可知,虽然在同一固定浓度下图像有所差异但计算的体积分数是相同的,证明了这一方法的可行性。



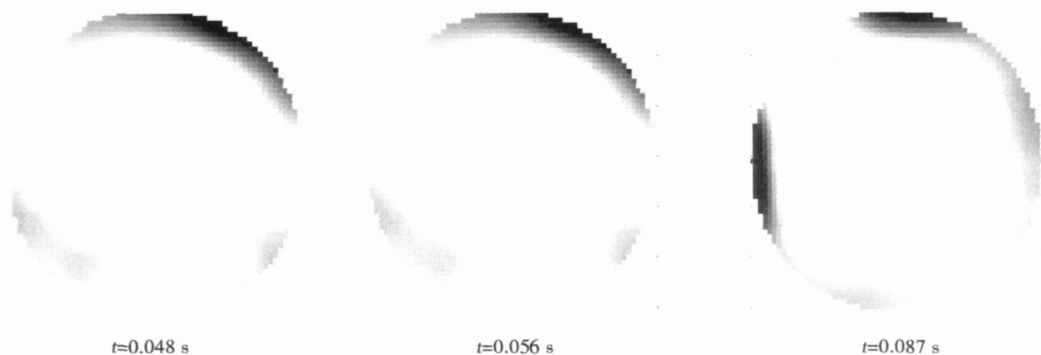


图 3 测量结果图像

### 3 结 论

针对火电厂及高炉煤粉喷吹炼钢中测量煤粉浓度的困难,提出了一种结合旋风分离装置的电容层析技术,该方法的优点是它不会对流场产生干扰,不受固体浓度、加速度、透明度的限制,合理利用电容敏感场的分布特性,提高了测量精度,能在线显示图像,为操作人员提供帮助。实验证明,电容层析成像技术的测量方法是可行的,采用迭代方法既提高了成像质量又不影响成像速度,并具体分析某种煤粉浓度下不同时刻的测量图像。但是由于电容层析技术发展时间短,许多技术和算法还不是很成熟,因此应用到实际中还有一定的难度,随着电容层析成像和算法的不断成熟,电容层析成像相关测试法仍具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 徐殿平,张云鹏. 锅炉风粉在线检测系统的应用[J]. 应用能源技术, 1999(6): 22-24.  
 [2] 方彦军,李敏. 火电厂锅炉一次风速及给粉浓度在线监测系统[J]. 动力工程, 1998, 18(6): 47-49.  
 [3] 朱波,肖大维. 煤粉测量方法的探讨[J]. 华中电力, 1999, 12(2): 17-19.  
 [4] 袁竹林,卢作基. 用传热法测量燃煤锅炉气力输送中煤流量的研究[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(1): 52-56.  
 [5] 施洪昌. 气固两相流测量系统[J]. 气动实验与测量控制, 1996, 10(4): 83-89.  
 [6] 刘学仁,金锋,陆增喜,等. 高炉喷吹煤粉总管质量流量的在线连续测量[J]. 钢铁, 2000, 35(1): 9-12.  
 [7] BECK M S, WILLIAMS R A. Process tomography: a European innovation and its applications[J]. Meas Sci and Technol, 1996(7): 215-224.  
 [8] DYAKOWSKI T, LUKE S P, OSTROWSKI K L. Application of capacitance tomography to gas-solid flows[J]. Chem Eng Sci, 1997(52): 2099-2105.

[9] WANG S, DYAKOWSKI T, BECK M S. An application of electrical capacitance tomography to measure gas-solid motion in fluidized bed // Heat-transfer[C]. Houston: AICHE Symposium Series, 1996, 156-159.  
 [10] YANG W Q, LIU S. Electrical capacitance tomography with square sensor[J]. Electronics Letters, 1999(35): 295  
 [11] XIE C G, HUANG S M, HOYLE B S, et al. Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors[J]. IEE Proc G, 1992, 139(1): 89-97.  
 [12] LIU S, FU L, YANG W Q. Optimization of iterative image reconstruction process for electrical capacitance tomography[J]. Meas Sci Technol, 1999, 10: 37-39.

(编辑 柴舒)

#### ° 书 讯 °

### 可再生能源开发技术

本书是“可再生能源开发应用技术丛书”之一。开篇简述人类社会发展的基本规律,依此引出人类社会对能源的依赖性和矛盾性,并对人类发展过程中已利用的、正利用的和将利用的能源作了系统的介绍。在后续的章节中,具体地介绍了化石能源中的煤、石油和天然气的使用情况,化石能源的可持续性和化石能源消耗对环境的影响;对具有可持续性的核能、太阳能、生物能等新能源的发展情况也作了详细阐述。对最具有潜力的氢能进行重点介绍,说明了氢的来源、用途及其利用方式,并描绘出使用氢能的美好前景。本书可作为大学本科生对能源世界认知的入门教材,也可作为能源、化学、汽车等领域研究技术人员的参考用书,还可供相关领域管理者参考。

2007年5月出版

rate  $G=400\sim 1200\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  and mass steam content  $x=0\sim 1.0$ . Through the tests, studied was the impact of working medium pressure, mass flow velocity and mass steam content on the frictional resistance. On the basis of a great deal of data obtained from the tests and related theoretical analyses, a correlation formula of frictional resistance of water-wall tubes was derived, which is suited for design purposes. The relative error between the calculated values and test ones does not exceed 15%. **Key words:** once-through boiler, steam-water two-phase flow, water-wall tubes, frictional resistance

煤种对超细煤粉再燃脱硝效率影响的数值研究 = A Numerical Study of the Influence of Coal Ranks on Reburning-based Denitration Efficiency of Superfine Pulverized Coal [刊, 汉] / JIA Yan-yan, BI Ming-shu, LIU Zhi (College of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 542~547

By using CFD (computational fluid dynamics) calculation software FLUENT6.1 a three-dimensional numerical simulation was performed of the superfine pulverized-coal reburning process in a full-size tangentially fired boiler. With five kinds of superfine pulverized coal having a comparatively big difference in coal quality serving as the reburning fuels, studied was the law governing the variation of  $\text{NO}_x$  emissions with the following factors: the length of the reburning zone, injection location of the reburning fuel, excess air ratio  $\alpha_{\text{op}}$  in the reburning zone and reburning quantity. The study results show that for different coal ranks serving as reburning fuels there exists an identical optimal injection location of a reburning fuel. The greater the coal volatile content, the more notable the reburning effectiveness. The  $\text{NO}_x$  removal rate increases with an increase of the length of the reburning zone and the reburning coal quantity. The excess air ratio in the reburning zone has a major influence on the  $\text{NO}_x$  removal rate. Through an analysis of the calculation results, an empirical formula was obtained, showing the relationship between the volatile content  $V_d$  of the dry fuel basis of the reburning pulverized coal and the optimal value of excess air ratio  $\alpha_{\text{op}}$  in the reburning zone, thus providing a convenient approach for the optimization of combustion parameters. **Key words:** superfine pulverized coal, reburning-based denitration, numerical simulation, full-size boiler

利用电容层析测量煤粉浓度的实验研究 = An Experimental Study of Pulverized Coal Concentration Measurement by Using Capacitance Tomography [刊, 汉] / SUN Meng, LI Zhi-hong, JIANG fan, et al (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 548~550

The accurate measurement of pulverized coal concentration in air pipes and its proper regulation are very important to the safe and cost-effective operation of a boiler during its combustion process. By using the capacitance tomography, tested and studied was the concentration of solid conveyed by a dilute-phase pneumatic force at a normal temperature. To overcome the impact of the nonuniformity of the sensitive field of a capacitance sensor on the image formation, a cyclone separator was set up in the test system. The role of the cyclone separator is to concentrate the solid particles mainly in the wall-surface zone with the electrodes of the sensor being located on the straight pipe of the separator. The advantage of the above testing method consists in its not demolishing the operating characteristics of the original system. The method pertains to a non-intrusive type of on-line quick testing technology. The test results obtained from the test stand and relevant on-line measuring system show that the method under discussion is feasible. **Key words:** pneumatic conveyance, capacitance tomography, measurement of flow rate, gas-solid two-phase flow

三偏心快关阀的液压系统设计与动态特性仿真 = Design of a Hydraulic System for a Three-eccentricity Quick Closing Valve and Simulation of its Dynamic Characteristics [刊, 汉] / LAI Xi-de, HE Hai-bin (College of Energy Source and Environment, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039), YANG Jiong-bo (Chengdu Huaxi Chemical Engineering Science and Technology Stock Co., Ltd., Chengdu, China, Post Code: 611830), ZHANG Ji-jun