

水煤膏冷态雾化试验装置和测量系统的研究

卢平¹, 陆勇², 章名耀²

(1. 南京师范大学动力学院, 江苏南京 210042;

2. 东南大学洁净煤燃烧与发电技术教育部重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要:建立了一套垂直式水煤膏雾化试验装置, 提出了通过采用 PIV 技术及二次开发的图像处理软件来测量水煤膏雾化颗粒的平均粒径与分布的方法, 分析了水煤膏雾化颗粒测量的影响因素, 为进一步研究水煤膏喷嘴雾化性能提供了保证。

关键词:水煤膏; 雾化; 试验装置; 粒径测量; PIV

中图分类号: TQ534.4 文献标识码: A

1 引言

水煤膏是由宽筛分的煤粉(通常为 0~6 mm)和水直接混合而成的高浓度(质量浓度大于 70%)液态燃料。水煤膏的雾化分散性能直接决定其在流化床内的着火、混合、燃烧和燃尽。世界各国都将水煤膏的雾化作为水煤膏湿法给料技术的重要内容, 目前研究的重点主要在于水煤膏燃烧特性^[1~4], 对于水煤膏喷嘴雾化特性的研究较少, 关于水煤膏雾化粒径大小及分布等的研究还是一片空白。日本 Kure 实验室建立了一套水平式水煤膏冷态雾化试验装置^[5], 采用滴落度(即未经雾化滴落下来的水煤膏与进入喷嘴水煤膏总量的比值)作为评价 CWP 不稳定喷注雾化性能的指标, 对水煤膏的雾化性能进行了初步研究, 由于试验装置和测试条件的限制, 关于雾化颗粒粒度分布等更详细的雾化质量指标未做进一步的研究。东南大学在 1 MWSEU-PFBC 试验装置上成功地实现了向 PFBC 连续添加水煤膏的 48 h 燃烧试验^[6]。研究表明: 雾化空气流量对水煤膏燃烧的影响很大, 当雾化空气流量不足时, 与喷嘴处于同一平面的床温波动幅度很大, 约 200 °C 左右。随着雾化空气流量的增加, 床温波动甚微, 床内温度均匀, 床内最大温差 30 °C, 各点处温度波动幅度只有 15 °C。分析上述现象的原因主要在于水煤膏雾化质量, 雾化质量越好, 水煤膏的分散程度越高, 床

温波动越小, 越有利于流化床的稳定操作。因此, 在进行燃烧研究的同时必须对水煤膏的冷态雾化性能进行深入的研究。

由于其浓度高, 粘度大, 颗粒粒径分布宽, 就其雾化而言, 要比一般的液体燃料(如轻质油、重油、水煤浆等)困难得多。对于其冷态试验系统的要求和雾化性能的测量手段, 也有较大不同之处。本文根据水煤膏雾化的特点, 建立了一套垂直式雾化试验装置, 首次采用 PIV 系统对水煤膏雾化进行拍照, 通过对 PIV 图像的处理, 获得了水煤膏雾化颗粒平均粒径和分布, 分析了水煤膏雾化颗粒测量的影响因素, 为进一步研究水煤膏喷嘴雾化性能以及雾化颗粒在床内的运动提供了基础。

2 试验装置与测量系统

2.1 试验装置

雾化试验装置是研究水煤膏雾化性能的重要手段, 常见的冷态雾化试验装置的型式有水平式和垂直式两种, 如美国 Hannifin Corporation、日本群馬大学、美国 C-E 公司、卡内基-梅隆大学和浙江大学等^[7]。比较两种装置型式, 前者整个试验装置高度低, 操作比较方便, 但由于雾炬受重力影响较大, 雾炬外形有可能偏转, 从而改变颗粒运动轨迹; 后者可以尽可能的减小重力场对于颗粒运动轨迹的影响, 便于提高测量精度, 然而整个装置高度较高, 运行操作不太方便。由于水煤膏雾化颗粒较粗, 为避免重力对雾炬特性的影响, 设计了如图 1 所示的垂直式水煤膏雾化冷态试验装置。该装置主要由水煤膏制备与输送系统、雾化空气系统、引风除尘系统、水清洗系统和测量系统等五个系统组成。采用螺杆泵输送水煤膏, 水煤膏的流量通过电磁流量计测量。雾

收稿日期: 2002-05-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G199902210531)

作者简介: 卢平(1968-), 男, 江苏六合人, 东南大学讲师, 博士后。

化空气由空气压缩机提供, 压缩空气流量由浮子流量计测定。雾化粒径大小与分布的测量采用 PIV 系统及二次开发的数字图像处理软件处理。

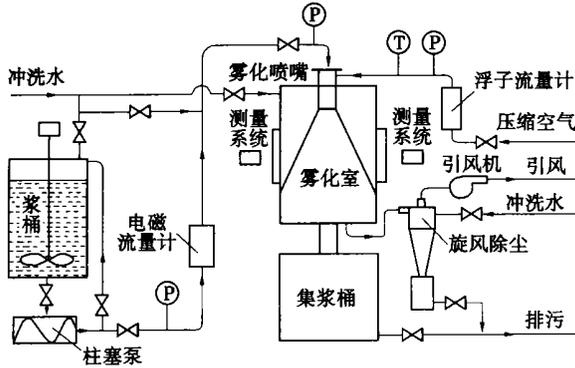


图 1 水煤膏喷雾性能试验装置

2.2 测量系统

水煤膏雾化性能测量系统如图 2 所示。PIV 仪是由丹麦 Dantec 公司制造的 Flow Map 型 PIV 仪 (Particle Imaging Velocimetry, 粒子成像速度仪)。该测量仪由示踪粒子发生系统、激光发射系统、图像记录系统和数据处理系统组成。激光发射系统包括大功率激光器、控制器、透镜组和光路等; 图像记录系统包括 CCD 摄像机和存储体; 数据处理系统一般包括一台高速计算机数据采集处理模块和相应数据处理软件⁸。

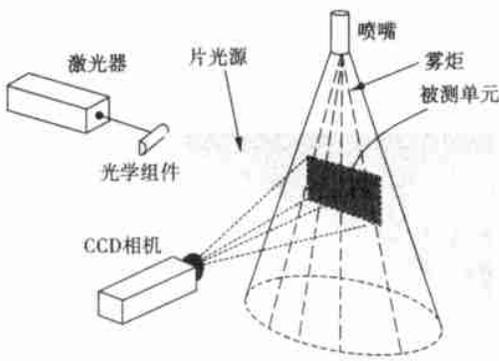


图 2 PIV 测量原理示意图

2.3 测量原理与算法

雾化粒径测量的基本原理是利用数字图像处理技术, 在流场测量过程中, 在确定图像中各颗粒位置的同时, 通过对 PIV 技术所拍摄的图像的处理, 得到粒子尺寸及分布的信息, 其研究的核心问题在于数字图象处理方法和算法的选择。测量时, 激光器按一定的频率发出激光, 经透镜组形成片光源入射被

测流场, 水煤膏在气流作用下雾化分散, 流过测试区域, 相机聚焦到光平面上, 记录激光的曝光结果, 再通过图像分析可得水煤膏雾化粒子的粒径大小及分布⁹。

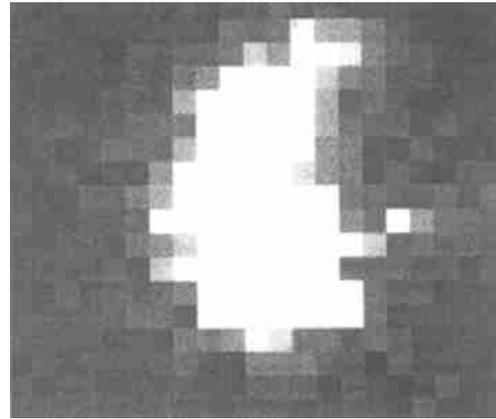


图 3 水煤膏雾化粒子放大图像

图 3 为用 PIV 系统实拍的水煤膏雾化粒子的放大图像, 其中白色亮点部分为水煤膏雾化粒子。由图像分析可知: (1)

雾化粒子形状不规则; (2) 从粒子的灰度中心 (灰度最大值) 到粒子的边缘 (背景) 有一个逐渐减弱的灰度变化; (3) 粒子图像的灰度中心并不一定是粒子的几何中心; (4) 在粒子与背景间灰度的变化最大, 即灰度的梯度值最大。

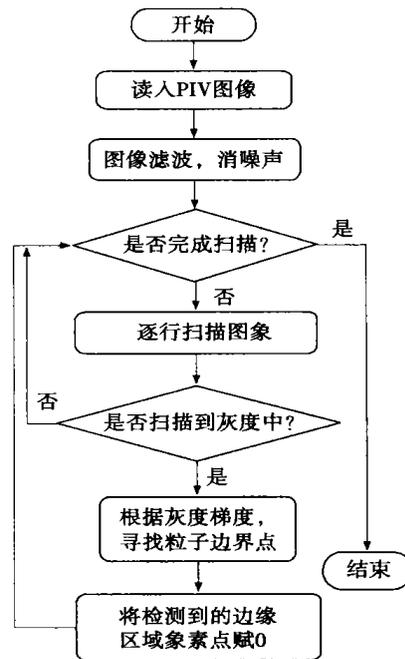


图 4 图像处理程序流程图

根据粒子图像的上述特征, 可以由图像的灰度梯度来进行粒子边界的识别, 即从粒子图像的灰度中心点出发, 计算与灰度中心相邻各点间的梯度值, 然后由这些点出发计算与各自相邻点的灰度梯度值, 以此类推, 直到粒子的边缘为止, 即粒子边缘点与背景的梯度值小于预先设定的阈值, 而且该点与相邻点的灰度值接近背景的灰度。找到各粒子的边界后, 就可以计算出该粒子在图像中所占的面积, 即包含多少个象素点。根据单位象素点所代表

的实际长度, 换算出粒子的实际面积 S , 然后保持面积不变, 将不规则形状的粒子折算成等效的球形粒子, 得到相应的等效直径, 即:

$$d_p = \sqrt{4S/\pi} \quad (1)$$

式中: d_p 是等效直径, S 是粒子的实际面积。有了各粒子的等效直径, 可以将图像中的粒子按尺寸分类, 于是就得到了相应流场的粒子尺寸分布, 进而得到粒子平均粒径等信息。本算法首先采用 Wiener 滤波法消去图像的噪声, 并进行边界加强、校正阴影等预处理, 以改善图像质量, 再根据上述灰度梯度最大原理寻找粒子边界, 统计出粒子的个数和像素, 进而计算出颗粒粒径和分布。本算法的示意流程图如图 4 所示。

3 实验结果与分析



图 5 水煤膏雾化粒子实拍图像

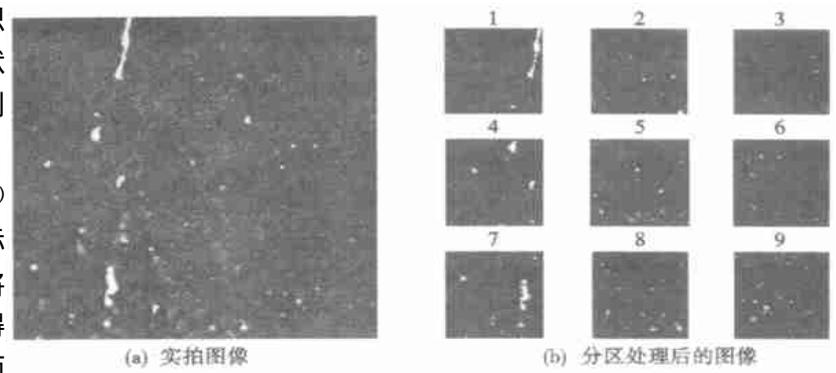


图 7 粒子分块处理方法示意图

背景, 而且还有利于提高雾化粒径测量的精度。

图 6 为根据本文提出的算法所得到的粒子分布图, 其中横坐标代表粒子的等效直径, 纵坐标代表粒子的质量百分数。由图可知, 雾炬场中粒子粒径分布较宽, 为 0~7 mm。根据粒子个数分布的统计, 通过一定的处理, 还可以得到雾化的累计分布和平均粒径(MMD、SMD)等表示雾化性能的参数, 为水煤膏喷嘴雾化性能的研究提供了基础。

膏状混合物雾化粒径的测量是一个世界性难题, 影响粒径测量其雾化粒径测量因素较多, 就本文提出的方法还有值得进一步研究的问题存在, 如灰度梯度阈值的确定, PIV 系统的系统误差等。

3.1 灰度梯度阈值的确定

在图像处理中, 灰度梯度阈值的确定对于粒子个数和粒子边缘的判别非常关键。由于该算法需要事先给定灰度梯度的阈值, 因此具有一定的人为因素。为减小因人为确定造成的误差, 对于背景灰度差别较大的图像, 采用分成若干区域区分别处理(如图 7), 并结合雾炬场粒子空隙率的方法来加以解决, 即对于每一个区域给定一个阈值, 再根据该阈值计算图像颗粒像素点的面积, 得到两相流空隙率, 如果大于某一给定值, 则认为该阈值为最低值, 以下不再搜索。但这样的处理方法仍然有一定的人为因素, 只是该值的选取与两相流的某些特性相关联, 具有一定的合理性。尽管如此, 如何选取合理的阈值仍然值得进一步研究。

3.2 测量系统的系统误差

测量系统的系统误差主要来源于激光片光源和 CCD 相机。激光片光源主要由于其厚度和强度两项指标确定, 激光强度决定了被测量区域内颗粒照亮的程度, 而厚度则决定了测量取样雾炬的厚薄。为了

图 5 为采用 PIV 实拍的雾化粒子图像。由图可知, 雾化粒子在雾炬场中分散较好, 且其分布具有一定的规律性, 这说明采用 PIV 技术测量并结合适当的算法来测量水煤膏雾化颗粒粒径是可行的。问题的关键在于图像处理方法的选择, 即将粒子从图像中有效地分离出来。

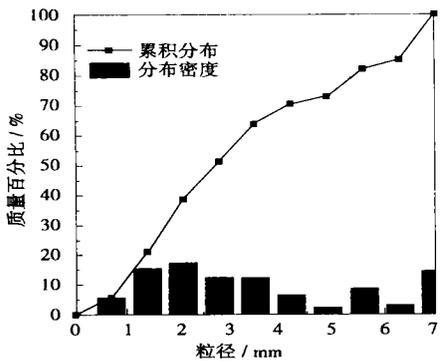


图 6 雾化粒子分布图

合适的数字图像处理不仅可以很好的分辨出粒子与

获得比较满意的测量效果,要求激光具有一定的强度和合适的片光源厚度,以便于穿透雾炬,照亮颗粒,从而提高图像分辨率,特别是小颗粒的分辨率。

CCD 相机的分辨率是另一个主要的系统误差来源,对于本文所采用的 CCD 相机而言,其最小分辨颗粒粒径约为 $150\mu\text{m}$,这对于水煤膏的雾化而言,完全可以满足测试的要求。但若测量粒度更小的颗粒时,必须对 CCD 相机的放大倍率作适当的调整,以提高粒子图像的分辨率,减小测量的系统误差。

4 结 论

(1) 建立了垂直式水煤膏雾化试验装置,该装置不仅可以进行水煤膏雾化性能的测量,还可以进行其它液体雾化性能的实验研究,测量参数全面,操作方便简单,运行可靠。

(2) 采用 PIV 技术和数字图像处理相结合的方法成功实现了测量水煤膏雾化颗粒粒径。

(3) 提出了一种以灰度梯度判别粒子边缘的算法,并应用该算法对水煤膏雾化颗粒图像进行了处理,给出了水煤膏雾化粒子大小和分布,为水煤膏雾化性能研究提供了依据和保证。

(4) 影响水煤膏雾化粒径测量的主要因素有数字图像处理阈值的确定、PIV 片光源的强度与厚度及 CCD 相机的分辨率等。

参考文献:

- [1] WRIGHT S J, FUIROLOUGH R, BOOTH B. The engineering and operating experience of coal-water slurries to grintorpe pressurized fluidized-bed combustor[A]. *Proc of 10th Inter Conf on FBC[C]*. San Francisco, California USA: ASME, 1989. 381-388.
- [2] WEDEL G V. The pressurized bed combustor at Anchen technical university[A]. *Mustonen J P Eds Proc of 9th Inter Conf on FBC[C]*. Boston, Massachusetts, USA: ASME, 1987. 250-255.
- [3] JANSSON S A. A n up-date test experience from the ASEA PFBC component test facility[A]. *Mustonen J P Eds Proc of 9th Inter Conf on FBC[C]*. Boston, Massachusetts, USA: ASME, 1987. 242-249.
- [4] 蒋旭光. 压力流化床燃烧煤水混合物燃料泵送给料技术在国外的研究进展[J]. *煤炭转化*, 1994, 17(2): 54-60.
- [5] TAKEZAKI H. A method of state feeding coal-water paste into pressurized fluidized bed combustor[A]. *Rubw L, Commonwealth G. Proc of 12th Inter Conf on FBC[C]*. San Diego, California, USA: ASME, 1993. 397-401.
- [6] 刘前鑫. 向加压流化床添加水煤膏的试验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 1997, 3(4): 385-387.
- [7] 岑可法. *煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]*. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [8] 卢平. 水煤膏输送特性和喷雾特性及其直接数值模拟的研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.
- [9] 张纪鹏. 用于柴油机喷雾场测试的 PIV 系统[J]. *内燃机学报*, 1999, 17(2): 204-205.

(何静芳 编辑)

3~9 MW 冲压式发电机组

据《Gas Turbine World》2002 年 5~6 月号报道,美国 DOE(能源部)计划一个涡轮动力系统先进动力装置的项目,现在由华盛顿州贝尔维尤市 Ramgen Power Systems 公司研制冲压式发电机。

该公司把航空冲压式喷气发动机技术应用到固定式工业电力生产系统。

冲压式发电机的发动机是围绕可压缩气体动力学现象,设计为布雷顿循环,它用斜击波和超音速过程代替常规燃气轮机的机械压缩和膨胀系统。

生产型机组将是 2.8 MW 设计的比例放大。规划的发电机组设计的简单循环效率对于 3 MW 机组为 37%,对于 9 MW 机组为 45%。排放的 NO_x 小于 10 ml/m^3 , CO 小于 35 ml/m^3 。

(思娟 供稿)

局域波法在转子系统多故障监测中的应用研究 = **Applied Research of a Local Wave Method Used for the Monitoring of Multiple Faults in a Rotor System** [刊, 汉] / WANG Feng-li, MA Xiao-jiang (Mechanical Engineering Institute under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 139—142

Based on the local characteristics of signals, a local wave method (LWM) can be employed to obtain the instantaneous frequency of signals and the Hilbert time-frequency spectrum composed of an energy-time-frequency three-dimensional distribution. The LWM was used to analyze the vibration characteristics, which emerge during the coupling of a crack and a rub-friction fault in a rotor system. It has been discovered that the LWM is especially suited for the analysis of nonlinear and non-steady signals, and capable of clearly describing the time-frequency characteristics of vibration signals. This can provide in engineering practice a helpful basis for the monitoring and diagnosis of faults in a rotor system. **Key words:** rotor system, local wave method, Hilbert time-frequency spectrum, fault diagnosis

CFB 锅炉内物料停留时间的模型研究 = **Modeling Research of Residence Time of Materials in a Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / YANG Hai-rui, LU Jun-fu, et al (Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) WIRSUM M (Thermal Energy Engineering Institute under the Siegen University, Siegen, Germany, D57076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 143—146

During a model study of bed material balance in a circulating fluidized bed (CFB) boiler the effect of attrition process on that balance should be taken into account. In this connection the authors have come up with a new concept of the residence time of materials by grading the latter according to their particle diameter and age. With the help of a model calculated was the residence time profile of material particles of various sizes. The residence time thus derived agrees conceptually with that obtained as a result of dividing a total bed inventory by material feed rate. However, this also profoundly reflects that materials of a same particle size may not have the same residence time in a fluidized bed. On the basis of this understanding a model calculation was conducted of the residence time profile of the materials in the CFB bed boiler. Furthermore, with the help of the model also studied was the influence of different operating parameters on the residence time of the particles. **Key words:** residence time, attrition, age

水煤膏冷态雾化试验装置和测量系统的研究 = **The Study of a Cold-state Atomization Test Rig and a Measurement System for Coal-water Paste** [刊, 汉] / LU Ping (Power Engineering Institute under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042), LU Yong, ZHANG Ming-yao (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology and Thermal Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 147—150

A vertical test rig for the atomization study of coal-water paste has been set up and a method proposed for measuring the particle average diameter and distribution of water-coal paste atomized particles with the use of a PIV (particle image velocimetry) technique and a newly developed image-processing software. All factors, which may have an impact on the measurement of the coal-water paste atomized particles, are analyzed, creating a solid basis for the further research of the nozzle atomization properties of the coal-water paste. **Key words:** coal-water paste, atomization, test rig, particle size measurement, particle image velocimetry

切向炉内多组小屏尾部分离涡的研究 = **An Experimental Study of Separated Vortices at the Tail Section of Multi-platenlets in a Tangentially Fired Furnace** [刊, 汉] / DIAO Yong-fa, HE Bo-shu (National Key Lab on Clean Coal Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), XU Jin-yuan, et al (Institute of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 151—154