

# 气液两相流容积含气率的图像检测方法

周云龙, 尚秋华, 范振儒, 洪文鹏

(东北电力大学 能源与机械工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 研究开发了一种在线检测气液两相泡状流容积含气率的方法。该方法基于数字图像处理技术, 采用高速摄像仪系统, 对垂直上升管道中泡状流流动过程进行实时拍摄和图像采集, 利用边缘检测和图像填充技术提取并计算气泡尺寸, 从而计算容积含气率。对不同工况下的容积含气率进行了实时在线检测, 实验结果表明: 检测值与真实值比较, 相对误差不超过 15%, 具有较高的测量精度, 可以用于气液两相流参数的在线检测。

**关 键 词:** 气液两相流; 容积含气率; 图像处理; 气泡

中图分类号: O359.1 文献标识码: A

## 引 言

两相流广泛存在于化工、冶金和能源等各个工业领域。大量实例所反映的两相流涉及范围的广泛性及其应用的重要性, 促使了两相流领域研究工作的迅速发展, 同时也成为国内外学者极大关注的前沿课题<sup>[1]</sup>。含气率是气液两相流系统的关键参数之一, 它对确定气液两相流系统的流型、气液分相流量以及管道中的摩擦压降、重力压降和加速压降等起着重要作用。同时, 两相流含气率的在线测量可为两相流混合物平均密度的求取、流量和压力梯度的测量、管内流动状况的分析等提供依据。因此, 准确地测量两相流含气率具有十分重要的意义。目前, 国内外对两相流含气率的测量研究较多, 测量方法有快速关闭阀门法、电导法、射线衰减法、压差法、微波法、光纤探针和电导探针法等<sup>[2~7]</sup>。但这些方法测量的数据多为单点、定常或定时均值, 不能测量整个流动断面上的瞬时含气率分布。

近年来, 随着计算机技术的发展, 数字图像处理作为一种现代化信息处理技术已被大量用于两相流的实验研究中, 它具有非接触、可视化、在较大流动区域内可对各相运动同时进行瞬时测量的特点。本

研究采用数字图像处理技术, 对垂直上升管内气液两相流气泡尺寸和容积含气率进行了研究, 得出一种在线检测气液两相流容积含气率的方法。

## 1 实验装置及方法

实验系统如图 1 所示, 主要由流体控制系统和图像采集处理系统组成。流体控制系统主要有空气压缩机、两相混合器、水泵、旋风分离器、水箱及实验段组成。实验采用空气和水为实验工质。水由水泵抽出, 经电磁流量计计量后进入混合器。空气经空气压缩机和气体孔板流量计后进入混合器。从混合器流出的细泡状流, 流经实验段后进入旋风分离器, 分离出的气体排入大气, 水排入水箱循环使用, 实验段为直径 50 mm 透明有机玻璃管。图像采集系统采用瑞士 WEINBERGER 公司生产的 SpeedCam Visario 高速摄像仪系统, 其最大分辨率为  $1\ 536 \times 1\ 024$ , 最大帧频为 10 000 帧/s。高速摄像仪对光线的亮度有较高的要求, 实验中使用 500 W 的卤素灯进行照明。在图像采集过程中, 由于液体和气体都是透明的, 可采用逆光照明。为了获得满意的图像质量, 在实验

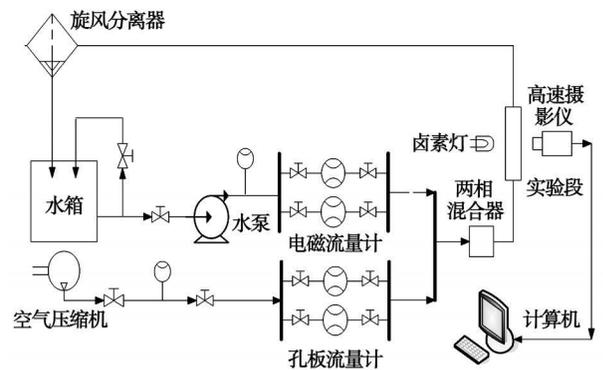


图 1 实验装置示意图

收稿日期: 2007-10-11; 修订日期: 2007-10-30

基金项目: 吉林省科技发展计划基金资助项目(20040513)

作者简介: 周云龙(1960-), 男, 吉林扶余人, 东北电力大学教授, 博士生导师。

段后侧放置两层绘图用硫酸纸。

实验方法为：先调节水流量调节阀，把水流量控制在一个流量点，再通过调节气体流量来改变流经实验段的总流量和容积含气率，重复上述实验。实验过程中，利用高速摄影仪系统对流动过程进行实时拍摄和图像采集。本实验中，拍摄图像的大小为  $220 \times 191$ ，帧频为 250 帧/s。工质参数范围：压力 0.1~0.4 MPa，温度 20~35 °C，水流量 5~15 m<sup>3</sup>/h，气流量 0.01~1 m<sup>3</sup>/h。

## 2 图像处理

### 2.1 图像预处理

由于原图像含有较大的噪声，灰度对比度比较低，图像背景亮度不均匀，部分气泡边缘信息很弱，不利于图像的分割和识别，需要先对图像进行预处理。采用形态学中的开运算和闭运算相结合的方法对图像进行消噪和增强处理，以均匀背景亮度，增强图像对比度。处理前后图像如图 2 和图 3 所示。

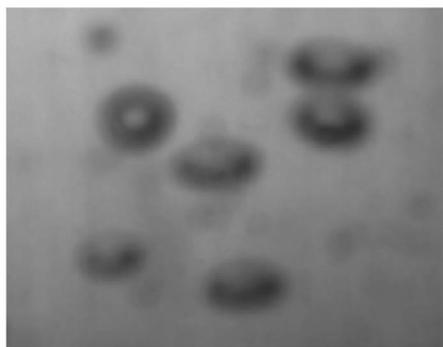


图 2 原始图像



图 3 预处理后图像

### 2.2 气泡边缘检测

图像预处理完成后，对图像进行分割，并运用医学上用于检测细胞边缘的精确检测方法检测气泡边

缘。该方法改变了传统边缘检测算法的处理顺序，利用最佳阈值分割和轮廓提取相结合的方法实现边缘检测，能有效抑制噪声干扰的影响，保证了目标图像边缘的连续性、完整性和精确定位。具体步骤：(1)用迭代法求最佳分割阈值，分割图像，将原图变成二值图像；(2)选取结构元素为  $3 \times 3$  的黑点块；(3)对二值图像进行腐蚀，消除目标图像的边界点；(4)用原二值图像减去腐蚀后图像，从而得到完整的目标图像边缘。经过上述运算后，气泡边缘被检测出来，如图 4 所示。

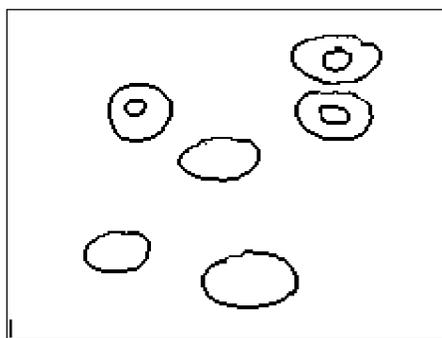


图 4 边缘检测后的图像

### 2.3 气泡区域填充

为了准确地检测出气泡的尺寸，需要进一步对图像进行填充。采用区域标定法<sup>[8]</sup>，即识别出所有气泡以外的面积，并用特征值给予标记，其算法如下：

(1) 首先标记像素矩阵左上角的特征值为 1，然后从上往下、从左向右扫描像素矩阵，如果当前像素为 255(空白像素)，且该像素相邻八邻域中的上方四邻域(左边，左上，顶部，右上)中有标记，则将当前像素标记。若当前像素为 255，且上方四邻域中没有标记 1，则用标记 2 给予标记；

(2) 从下往上、从右向左对像素矩阵进行扫描，若当前像素有标记 2，其下方四邻域(右边、右下、下边、左下)中有标记 1，则将其换为标记 1；

(3) 没有标记 1 的像素用零(全黑)填充。

经过上述处理后，气泡中心区域被填充，如图 5 所示，此时两相流中气泡图像变得更加清晰，这为进一步对气泡进行定量分析做好了准备。

### 2.4 气泡区域标定

要分析二值图像中各个连通区域的大小，以计算图像中各个气泡的面积、周长等参数，需要对目标图像进行标记，即用不同的整数值给各个连通区域贴标签。设二值图像为  $f$ ，标签图像为  $g$ ，标记算法的具体步骤如下<sup>[9]</sup>：

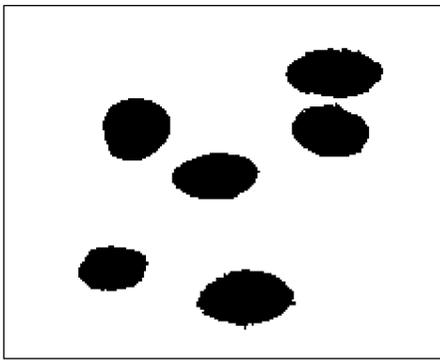


图 5 填充后的图像

(1) 设标签  $\lambda=0$ , 已贴标签数  $N=0$ , 按照从左到右, 从上到下的顺序进行扫描, 寻找像素值为零的目标点像素。

(2) 对尚未贴标签的目标点像素  $f(i, j)$ , 如果其上方四邻域(左, 左上, 上, 右上)所有的值为 1(背景), 则  $\lambda=\lambda+1, g(i, j)=\lambda$ , 已贴标签数  $N=N+1$ ; 如果其上方四邻域的标签值相同, 即全部为  $\lambda(\lambda > 0)$ , 则  $g(i, j)=\lambda$ ; 如果其标签值有 2 种(不可能有 3 种以上), 即四个邻接像素的取值为  $\lambda, \lambda_m(0 < \lambda < \lambda_m)$ , 这时称为标签冲突, 令  $g(i, j)=\lambda$ , 将所有标签为  $\lambda_m$  的像素改贴标签  $\lambda$ , 同时将已贴标签数进行修正,  $N=N-1$ 。

(3) 扫描完毕后, 各个目标图像都有自己特定的标签。

(4) 判断是否满足  $\lambda=N$ , 如果是, 则完成贴标签操作。如果不是, 则表明已贴标签是不连续编号, 可以对其校正为连续编号, 完成标记。

### 3 参数的计算

#### 3.1 气泡尺寸

气泡在水中上升时, 它们的主要形状近似为球形或扁球形。为了简化计算, 本文将所有气泡按球形处理, 并定义气泡的面积为各个连通域中像素的总数, 周长为包括各个连通域的边界轮廓线的长度。考虑到气泡并非标准的球形, 引入形状参数来衡量气泡接近球形的程度, 形状参数的定义如下:

$$E_i = P_i^2 / 4\pi A_i \quad (1)$$

式中:  $P_i$ —图像中第  $i$  个气泡的周长 ( $i=1, 2, \dots$ );  $A_i$ —图像中第  $i$  个气泡的面积;  $E_i$  的值越接近 1 表明气泡越接近球形,  $E_i$  等于 1 表示气泡为球形。

#### 3.2 容积含气率

气泡的体积按下式计算:

$$V_i = \frac{4}{3} \frac{A_i^{3/2}}{\pi^{1/2}} \quad (2)$$

统计图像中所有气泡的体积, 就可以计算出气液两相流的容积含气率:

$$\beta = V^{-1} \sum_{i=1}^N V_i \quad (3)$$

式中:  $V_i$ —图像中第  $i$  个气泡的体积;  $N$ —图像中气泡总数;  $V$ —一帧图像对应柱体的体积。

本研究实验段为圆管, 所以  $V$  按圆柱体体积计算:

$$V = \frac{\pi}{4} L^2 H \quad (4)$$

式中:  $L, H$ —分别为拍摄图像的宽和高(按像素计算), 如图 6 所示。

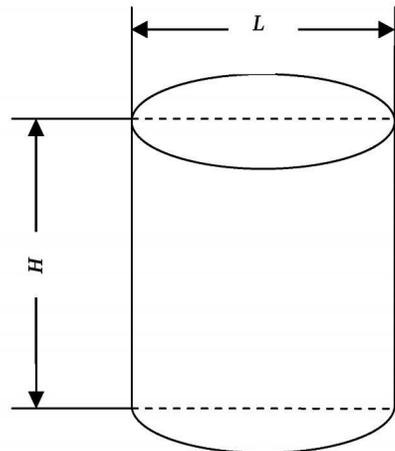


图 6 二维图像对应柱体示意图

### 3.3 实验结果及分析

按上述算法对图 5 进行计算, 得出图像中各气泡的体积和形状参数, 计算结果如表 1 所示, 由此计算出的容积含气率  $\beta$  为 1.30%。

表 1 测量图像中气泡体积和形状参数

气泡编号	$V$ (像素)	$E$
1	1 018	1.28
2	923	1.02
3	875	1.14
4	881	1.22
5	745	1.16
6	1 126	1.29

为了研究上述图像处理方法在线检测容积含气率的可行性, 在液相流量为 13.234 m<sup>3</sup>/h、气相流量为 0.93 m<sup>3</sup>/h 的工况下, 对容积含气率进行了实时在线检测。实验过程中, 对所拍摄的图像每隔 6 帧

处理一次, 计算得到不同时刻的容积含气率, 数据处理结果如图 7 所示。从图中可以看出, 容积含气率随时间的变化曲线分为两部分。检测时间小于 3 s 时, 容积含气率呈现无规律变化, 且变化幅度很大, 最大值达到 9.1%, 而最小值仅有 3.5%。而检测时间大于 3 s 后, 容积含气率趋于稳定, 围绕  $\beta=6.5\%$  上下波动, 且误差不超过 15%。检测时间较短时, 容积含气率的无规则变化是由于工况改变时流动不稳定, 导致流场中气泡分布不均匀造成的。检测时间超过 3 s 后, 流动工况达到稳定, 流场中气泡分布均匀, 因此容积含气率也趋于稳定。此时容积含气率的上下波动, 是由实验过程中水泵与空压机等装置运行时引起的震动造成的。通过以上分析可以得出, 所提出的图像处理方法可以用于容积含气率的在线实时检测。

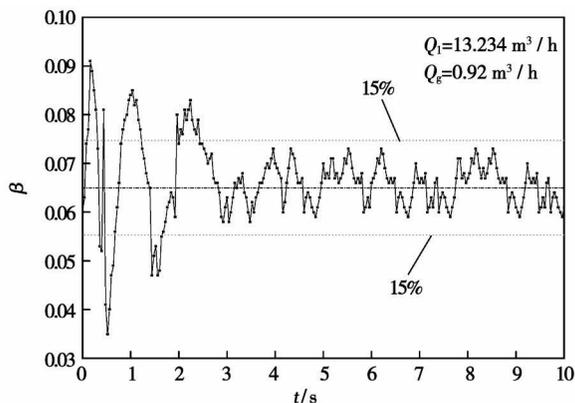


图 7 容积含气率检测值随时间的变化曲线

图 8 是不同工况下利用图像处理方法得到的容积含气率与真实容积含气率的比较曲线。图中容积含气率的真实值  $\beta_{tr}$ , 由气相和液相的分相流量计算得出:

$$\beta_b = Q_g / (Q_g + Q_l) \quad (5)$$

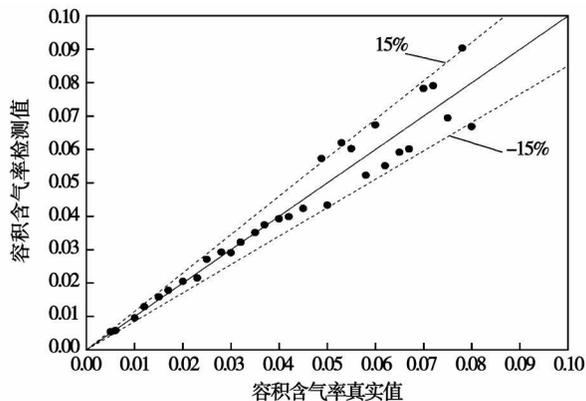


图 8 容积含气率检测值和真实值的比较图

从图中可以看出, 大部分点的相对误差均在 15% 范围内, 具有较高的精度, 可以满足测量要求。其中容积含气率较小时, 计算结果和真实值吻合较好, 当容积含气率大于 4% 时计算结果误差较大, 因为容积含气率较高时气泡比较密集, 部分气泡出现重叠和粘连现象, 气泡边缘的检测比较困难, 计算出的气泡体积误差较大, 所以由此得到的容积含气率误差也会较大。

本研究提出的垂直上升管内气液两相流容积含气率的图像测量方法的测量误差主要来自以下 3 个方面:

(1) 是来自实验方面。对于气液两相流而言, 气泡与水都是透明的, 且其交界面对光线的反射明暗层次多, 又由于运动的关系, 气泡具有幅度和频率都较大的不规则变化, 因此要获得具有清晰边缘的气泡图像, 就需要有高质量的光源。由于实验条件限制, 所选用的光源并不能完全满足要求, 因此难免会产生一定的误差。

(2) 是来自图像处理算法方面。由于受光照和设备等因素的制约, 实际拍摄的图像难免会含有较大的噪声, 因此边缘检测前要先对图像进行消噪, 但是几乎所有的算法在降低噪声的同时, 都会导致边缘信息的损失, 这就导致了气泡边缘检测的不准确, 从而造成测量误差。

(3) 是来自模型假设方面。基于图像处理技术的含气率测量模型是建立在气泡为球形, 即形状参数等于 1 基础之上的, 而实际中气泡不可能为标准的球形, 尤其是  $\beta$  较大时, 由于重力作用对大气泡的影响, 形状参数很大, 因此测量误差也较大。

实际生产过程中存在着许多高压的气液两相流, 而且大多采用金属管道。此时需在管道的适当位置设置一段能承受高压的透明管段或透明窗口 (可采用蓝宝石、石英玻璃或硼化玻璃等特殊材料)。能够实现容积含气率进行了非接触测量, 不会干扰生产设备的正常运行。此外, 实际中还可以通过改变拍摄窗口的大小和拍摄帧数来改变测量范围, 满足不同流场下的测量需要。如果对计算模型稍加改进, 此方法还可以进一步测量气液两相流中气泡尺寸分布、气泡速度等其它参数, 因此能够方便的实现气液两相流的多参数测量。

## 4 结 论

(1) 运用图像处理的方法对垂直上升管中容积

含气率进行了非接触测量, 测量结果与真实值进行比较, 相对误差小于 15%, 具有较高的测量精度, 为容积含气率的在线检测提供了一种新的有效方法。

(2) 本研究提出的容积含气率测量方法, 在含气率较低时, 测量值与真实值几乎完全吻合。本方法还可以进一步测量气液两相流中气泡尺寸分布、气泡速度分布等其它参数, 在实际的工业生产中有较强的适用性。

#### 参考文献:

- [1] 林宗虎, 王树众, 王 栋. 气液两相流和沸腾传热[M]. 陕西: 西安交通大学出版社, 2003.
- [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.
- [3] FASSA M. Design and performance of a conductance prob for measuring

the liquid in two-phase gas-liquid flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1998, 9(2): 103-109.

- [4] ANDERSON J L, FINCKE J R. Mass flow measurement in air-water mixtures using drag devices and gamma densitometer[J]. ISA Trans, 1980, 19(1): 37-48.
- [5] 罗毓珊, 李爱华, 陈听宽, 等. 差压法测量两相流相含率的研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(5): 789-792.
- [6] 刘 强, 郑莹娜. 多相流多参数动态测量技术发展与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2000(6): 52-54.
- [7] 唐人虎, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 高温高压下用光纤探针测量截面含气率的实验研究[J]. 化工学报, 2001, 52(6): 560-563.
- [8] 施丽莲, 周泽魁, 任沙蒲. 垂直管道中气液两相流参数的图像检测方法[J]. 流体机械, 2004, 32(9): 4-9.
- [9] 张东衡, 唐志航, 叶鸿明, 等. 一种气液两相流气相参数图像检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(5): 597-599.

(编辑 陈 滨)

### 新技术、新产品

## 钛合金类金刚石涂层制造工艺

采用复合法形成涂层, 同时通过脉冲真空电弧放电和离子流组成的金属熔合原子结合碳层。可应用于电子工业、机械制造、保健、石油开采。

设计指数——涂层厚度达 2 μm;

成分和结构指数——达 50% 高含量钛;

可靠性指数——在 10 000 个研磨周期后不存在剥离层;

延长工具寿命 2~3.5 倍。

在通过具有多层涂层的钻头在印刷板上钻孔时, 减少钻孔时间 40%, 钻的寿命延长 80%, 利用具有涂层的规尺延长使用寿命 2.5~4 倍。因为合金类金刚石涂层能将使用寿命提高 25~30%, 所以降低了生产成本。本工艺绿色环保, 满足现行标准。

## 超音速等离子喷涂技术与装备

超音速等离子弧喷涂技术是重要的表面工程技术之一。与其它的喷涂技术相比较, 它具有生产效率高、涂层质量好的特点。可以熔化金属、碳化物陶瓷和氧化物陶瓷等材料。乌克兰科学院巴顿电焊研究所研究的超音速等离子喷涂技术与装备具有显著的技术优势, 其最大工作电流达 400 A; 粉末颗粒飞行速度达到 750 m/s; 各种材料涂层的结合强度大于 55 MPa; 沉积率大于 60%; 金属粉末的送粉速度高达 50 kg/h。超音速等离子喷涂技术与装备广泛应用于冶金机械、交通车辆、船舶制造与维修、军工装备等领域。

(辉 供稿)

method, studied was the influence of the solid-phase particulate mass carrying rate in a two-phase turbulent flow of a flue gas desulfuration tower on the gas-phase flow field. When the particulate Stokes number in the tower is kept in a range from 1 to 100, the gas-solid flow coupling characteristics in the tower was analyzed by gradually increasing the particulate mass carrying rate. As a result, under different particulate mass carrying rates the in-tower gas-solid flow characteristics, the particulate concentration distribution along the axial direction, the gas-phase axial speed radial distribution and the bed layer pressure drop curves have been obtained. It has been found that when the particulate mass carrying rate is not greater than 0.031, the particulate flow exhibits a relatively good follow-up nature and assumes a pneumatic transmission flow state. In such a case, the particulate movement has an extremely small influence on the continuous phase field and can be neglected. When the particulate mass carrying rate is greater than 0.031, the gas-solid flow coupling action in the bed will be enhanced, and the discrete particulate movement will exercise a conspicuous influence on the gas-phase flow field. The gas-solid two-phase flow characteristics are dependent on each other and exhibit an obvious unstable state and non-uniformity. When the particulate mass carrying rate is relatively big, the bed layer pressure drop is closely related to the discrete particulate field distribution. **Key words:** direct simulation Monte Carlo method, gas-solid two-phase flow; coupling characteristics

气液两相流容积含气率的图像检测方法 = **Image processing-based Detection Method for the Measurement of Volumetric Gas Content in a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, SHANG Qiu-hua, FAN Zhen-ru, HONG Wen-peng (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 507 ~ 511

A method for the on-line detection of volumetric gas content of a gas-liquid two-phase bubble flow has been studied and developed. The method in question is based on digital image processing technology, employs a high-speed video camera system to conduct a real time camera shooting and image collection of the bubble flow process in vertical risers and makes use of rim detection and image fill-in technology to extract gas bubbles and calculate their sizes, thereby calculating the volumetric gas content. A real time on-line detection and measurement have been made of the volumetric gas content under different operating conditions. Test results show that compared with real values, the detected values have a relative error not exceeding 15%. Having attained a relatively high measurement accuracy, the method under discussion can be used for the on-line detection of parameters in a gas-liquid two-phase flow. **Key words:** gas-liquid two-phase flow, volumetric gas content, image processing, gas bubble

气化炉内撞击区气体浓度与火焰形状分析 = **Gas Concentration and Flame Shape Analysis of the Impinging Zone in a Gasification Furnace** [刊, 汉] / GUO Qing-hua, LIANG Qin-feng, YU Zun-hong, YU Guang-suo (Education Ministry Key Laboratory on Coal Gasification, East China Institute of Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 512 ~ 515

By using a water-cooled sampling tube and gas purification analytic system, a hot-state experimental study has been conducted of the gas concentration distribution of a nozzle plane in a gasification furnace. Through an image processing, the flame image was divided into three portions along the direction of a gas sampling tube: namely, a flame impinging zone, a transition zone and a flameless zone. Test results show that the gas constituents of the flame impinging plane in the gasification furnace are closely related with the flame shape, and the gas concentration in the transition zone has the greatest changes. The maximum concentration of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> appears at the central location of the furnace. In the flameless zone, the measured gas concentration has kept basically unchanged. The ratio of CO and CO<sub>2</sub> recovery rate can serve as an underlying basis for judging the flame shape, or when O<sub>2</sub> concentration decreases to less than 0.03%, it can be regarded as an extinguishment of the flame. **Key words:** impinging flame, gas concentration, gasification, multi-nozzle contraposition

气流式喷嘴雾化特性试验研究 = **Experimental Study of Atomization Characteristics of an Airflow Type Nozzle** [刊, 汉] / REN Lan-xue, MA Sheng-yuan, WANG Yong-feng, PANG Xue-jia (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 516 ~ 518