

# 激光多普勒测速技术在气液两相流中的应用

周 明 李文采  
(钢铁研究总院)

**提要** 本文采用激光颗粒动态分析仪 (PDA) 测量了钢包底部喷吹气液两相流中气泡的直径和气泡上升速度的分布; 采用激光多普勒测速仪 (LDA) 测量了气液两相区和液体单相循环区液体速度场的分布. 测量结果表明: 气泡在脱离喷嘴上浮一定距离后, 其大小基本保持不变; 在气液两相区中, 气泡速度和液体速度的分布均服从高斯分布; 液体在单相区作循环流动, 在侧壁与底部交接处, 存在液体流动的“死区”.

**关键词** 两相流, 气泡, 激光多普勒测速仪, 激光颗粒动态分析仪

## 一、前 言

近年来, 激光测速技术发展很快, 它具有不影响流场、灵敏度高的优点, 现已广泛地运用于各种流体流动领域. 在利用激光多普勒测速仪 (LDA) 测量液体单相循环区的液体流场方面, 人们已做了大量工作<sup>[1-5]</sup>. 但对气液两相区液体速度场实验研究的报道较少.

S. Schneide<sup>[6]</sup>、A. K. Chesters<sup>[7]</sup> 应用激光 LDA 测速仪测量了气液两相区内液体流场的分布, 在利用激光测速技术研究微气泡方面有少量报道<sup>[8]</sup>, 但在利用激光测速技术研究较大直径气泡的动力学行为方面尚未见报道.

本文采用激光颗粒动态分析仪 (PDA) 进行气泡上浮速度、气泡直径的测量; 用激光多普勒测速仪 (LDA) 进行气液两相区和液体循环单相区的液体速度的测量研究.

## 二、实验方法

### 1. 激光多普勒测速仪 (LDA) 系统

激光多普勒测速仪 (Laser Doppler Anemometry) 是一种非接触式测量方法. 此法根据散射光的多普勒频移原理, 两束激光相交区域形成亮暗相间的干涉场 (见图 1), 当微小粒子通过干涉场时, 发生亮暗交替的散射光, 单位时间内质点穿越亮条纹的数目即为多普勒频率  $f_D$ . 此频率的大小正比于质点运动速度, 即流体速度  $V$ :

$$f_D = f_s - f_i = \frac{1}{\lambda_D} \mathbf{V} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_i) \quad (2.1)$$

式中  $f_s$ 、 $f_i$  分别为散射光、入射光的频率.  $\lambda_D$  为入射光波长.  $\mathbf{e}_s$ 、 $\mathbf{e}_i$  分别为散射光和入

本文于 1989 年 7 月 28 日收到第一稿, 1989 年 12 月 12 日收到修改稿.

射光方向的单位矢量。

测出频差  $f_D$  即可得到流体中质点的速度即该点的流体速度。

## 2. 激光颗粒动态分析仪 (PDA) 测量系统

PDA (Particle Dynamics Analyzer) 测量装置示于图 2。PDA 是基于 LDA 原理的延伸, 发射光路配置为条纹式(见图 1)。当气泡(或颗粒)经过条纹系统一二束激光交点时, 产生散射光。接收光路包括位于  $70^\circ$  散射角上的三个光电倍增管检测器, 对散射光进行检测、放大和滤波。对应于两入射激光束有两种散射光。多普勒 (Doppler) 信号的相位依赖于这两种散射光的相位差, 用下式表示:

$$\phi_D = d_D \beta \quad (2.2)$$

$$\alpha_D = \pi D n_m / \lambda \quad (2.3)$$

式中  $\beta$  为几何因子,  $\alpha_D$  为颗粒尺寸参数,  $\lambda_0$  为激光在真空中的波长,  $n_m$  为散射介质的折射率,  $D$  为粒子直径,  $\phi_D$  为相位差。

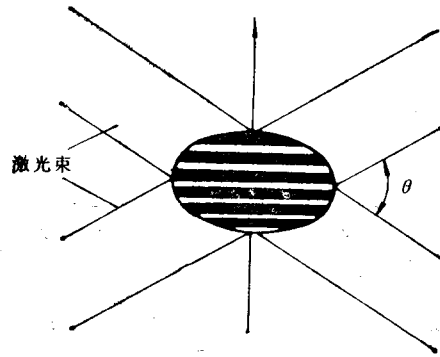


图 1 激光交点干涉条纹场示意图



图 2 激光颗粒动态分析仪实验装置

基于三个通道相位信息测出多普勒信号的相位, 便可计算出气泡的直径。其中一个通道的信号频率用于确定气泡速度, 其原理同 LDA。

## 三、实验结果和分析

### 1. 激光 PDA 的测量结果

本文采用 DANTEC 公司的激光 PDA 测速仪对气泡直径和气泡上升速度进行测量。

由于受 PDA 的设定条件限制,本文仅在喷嘴直径为  $\phi 0.8\text{ mm}$  的实验条件下进行测量。较典型的气泡上浮速度谱见图 3。

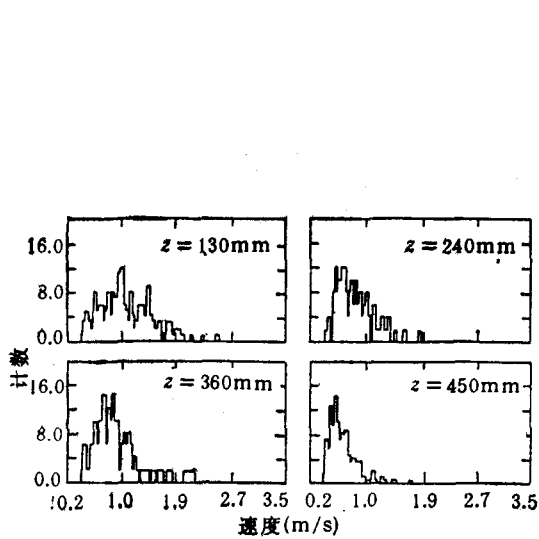


图3 激光 PDA 测量轴线上不同高度的气泡速度谱分布

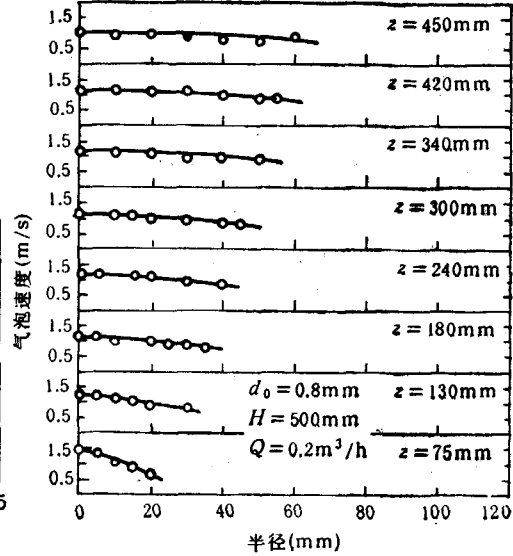


图4 激光 PDA 测量气液两相区不同断面上气泡速度的分布

图 4 为用 PDA 测量的两相区气泡速度分布。从 PDA 的测量结果并结合双触点电导探针测量气泡速度分布的结果<sup>[5]</sup>的分析可知,气泡上升速度分布在径向上服从高斯正态分布规律,高斯函数如下式所示

$$u_B = u_{B_{max}} \exp(-r^2/b_{u_B}^2) \quad (3.1)$$

式中  $u_B$  为两相区气泡上浮速度;  $u_{B_{max}}$  为轴线上的气泡速度;  $b_{u_B}$  为两相区气泡速度分布结构参数。

在不同高度上,气泡速度分布结构的参数  $b_{u_B}$  列于表 1。从表中可见,采用高斯分布函数进行回归分析,其相关系数值多数在 90% 以上,这表明高斯分布能较准确地描述两相区气泡上升速度的分布规律。

表 1 激光 PDA 测量气泡速度回归系数

轴向高度 $Z(\text{mm})$	50	75	100	130	180	240	300	360	420	450
轴向速度 $u_{B_m}(\text{m/s})$	1.42	1.4	1.25	1.22	1.15	1.16	1.12	1.15	1.14	1.02
喷射宽度 $b_u(\text{mm})$	18	23	33	44	59	71	80	95	104	110
相关系数 $R$	.997	.99	.935	.937	.954	.984	.992	.874	.965	.856
标准变值 $\sigma$	0.03	0.05	0.095	0.072	0.047	0.025	0.017	0.064	0.033	0.073

图 5 为气泡速度沿轴向上的分布。由图可知,气泡速度在轴向上呈 S 形分布,且当气

泡上升至一定高度时,气泡作匀速上浮运动。轴线上气泡速度  $u_{B_m}$  (m/s) 与高度  $Z$  (mm) 的关系可由下式表示:

$$u_{B_m} = \begin{cases} 2.9Z^{-0.179} & Z < 180 \text{ mm} \\ 1.14 & Z \geq 180 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.2)$$

图 6 为激光 PDA 测量的气泡直径  $d_B$  在各个不同高度的径向分布。由图可见,气泡直径在两相区各点上几乎相同。在喷嘴直径  $d_0$  为 0.8mm, 气体流量  $Q$  为 0.2 m<sup>3</sup>/h 的实验条件下,气泡平均直径约为  $d_B \approx 10$ mm。

### 2. 激光 LDA 的测量结果

本研究使用我院的二维激光多普勒测速仪, 分别测量了不同流量下单相区和气液两相区的流体速度。

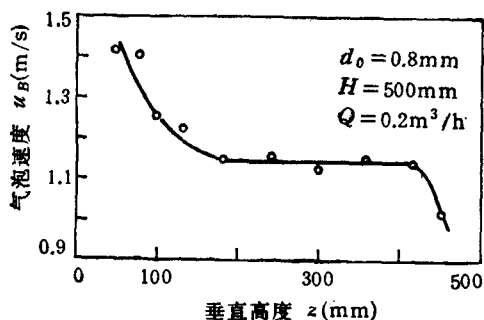


图 5 激光 PDA 测量气泡速度沿轴线上分布

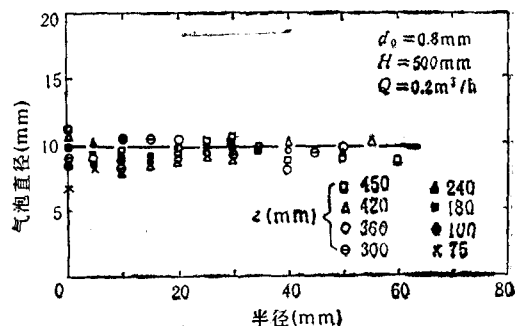


图 6 PDA 测量不同高度上气泡直径分布

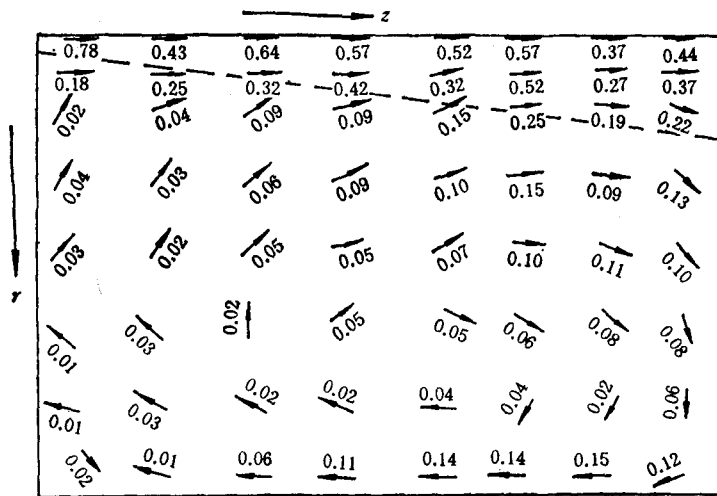


图 7 激光多普勒测速仪 (LDA) 测量熔池速度场分布  
喷嘴直径  $d_0 = 5$ mm, 熔池深度  $H = 400$ mm, 气体流量  $Q = 0.5$  m<sup>3</sup>/h

图 7 为激光 LDA 实测的底吹熔池液体流场分布。图中清楚地表明了液体的循环流动特性。钢包内液体流动速度场可分为三个区域,即气液两相区、液体循环区和“死区”。

图 8 为不同高度上,气液两相区液体速度的径向分布。由图可见,两相区液体速度在径向上呈高斯正态分布。分布函数如下式:

$$u_L = u_{L_m} \exp(-r^2/b_{rL}^2) \quad (3.3)$$

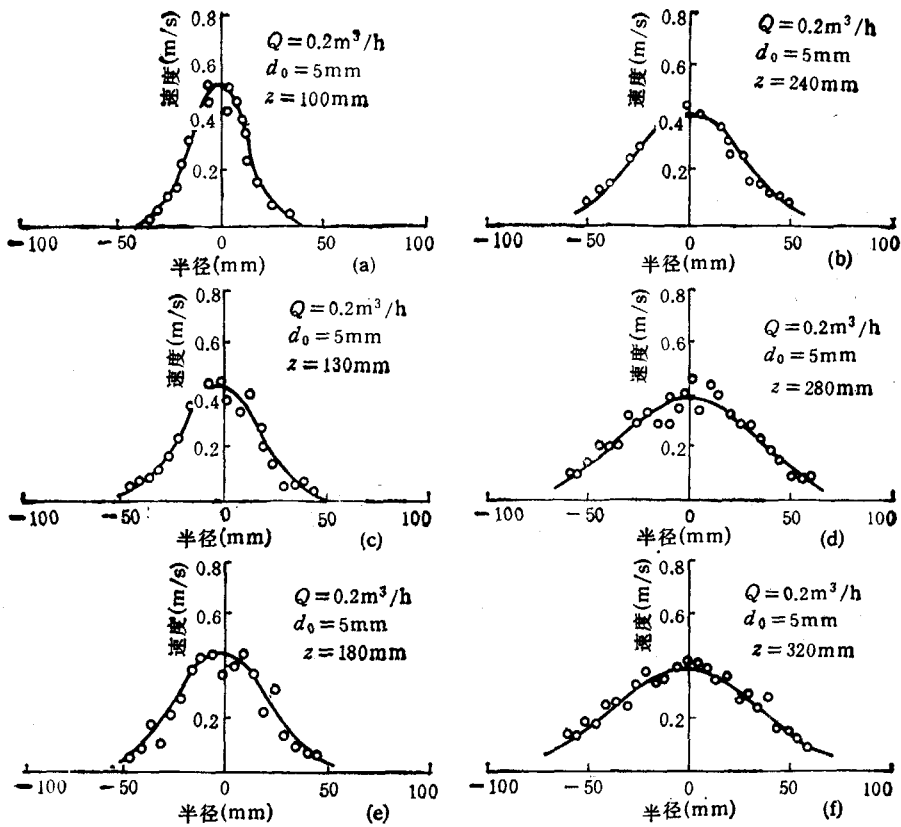


图8 两相区不同高度上液体速度的分布

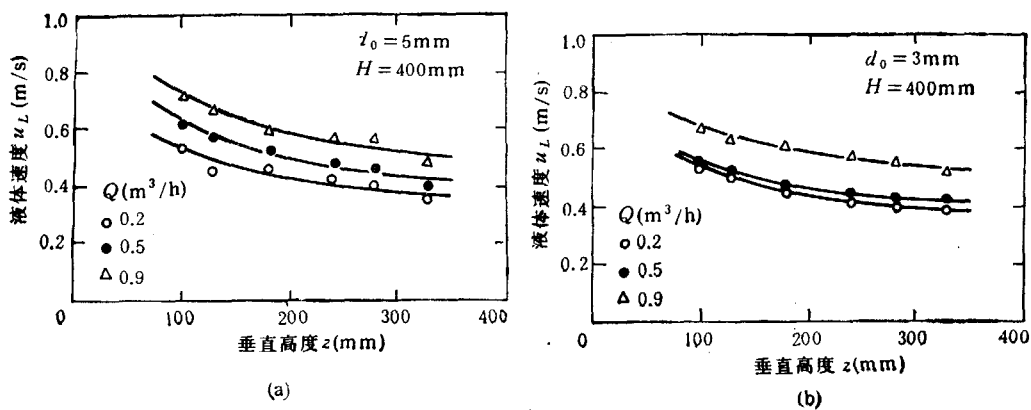


图9 两相区轴线上液体速度随高度的变化

式中  $u_L$  为两相区液体速度;  $u_{Lm}$  为轴线上液体速度;  $b_{u_L}$  为两相区液体速度结构参数。

图9为轴线上液体速度  $u_{Lm}$  随高度  $Z$  的变化规律。在熔池底部,液体中心速度较高;随着高度增加,中心速度趋于下降;在接近熔池表面区,液体运动方向改变,其轴向速度的

下降幅度增大。

从回归分析可知,  $u_{L_m}$  和  $b_{u_i}$  与高度  $Z$  的关系可用指数函数表示。

$$u_{L_m} = 3(Q \cdot \rho_i^N / \rho_g^0)^{0.138} Z^{-0.32} \quad (3.4)$$

$$b_{u_i} = 0.656(Q \cdot \rho_i^N / \rho_g^0)^{0.352} Z^{0.79} \quad (3.5)$$

式中  $Q$  为气体流量;  $\rho_i^N$ 、 $\rho_g^0$  为标准状态下、喷嘴处气体密度;  $Z$  为轴向高度。

#### 四、结 语

1. 激光颗粒动态分析仪 (PDA) 是近年来开发的测量两相流的新技术, 此技术的应用仍在探索开发阶段, 本研究在测量气泡直径为 10mm 左右的气液两相流动方面作了尝试, 并取得良好的实验结果。

2. 激光多普勒测速仪 (LDA) 通常被用来测量单相液体流场的分布。本研究经多次试验调节和测量参数的合理选择, 测量了气液两相区的液体速度场和单相循环区液体速度场的分布。

3. 本文结果表明, 两相区液体和气泡的运动过程具有相似特性, 其运动速度在径向上均服从高斯分布。

致谢 在本文的实验工作中, 我院梁严和丁永良工程师给予了十分宝贵的支持和帮助。

#### 参 考 文 献

- [1] 何庆林, 肖泽强, 喷射钢包内气液两相流结构的研究, 硕士论文, 东北工学院, (1984).
- [2] 杜嗣琛, 张家莹, 李英, 魏寿昆, 化工冶金, (1985), 123.
- [3] Sahai, Y., Guthrie, R. I. L., *Metall. Trans.* 13B (1982), 203—211.
- [4] Grevet, J. H., Szekely, J., El-kaddah, N. E., *Int. J. Heat Mass. Transfer*, 25(1982), 487.
- [5] 周明, 李文采, 气液两相流结构的研究, 博士论文, 冶金部钢铁研究总院 (1988).
- [6] Schneider, S., Oeters, F., Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben S219, Technischen Universität Berlin. (1987).
- [7] Chesters, A. K. et al., *Int. J. Multiphase Flow*, 6(1980), 195—210.
- [8] Sun, T. Y. et al., *Int. J. Multiphase Flow*, 12(1986), 99—114.

## APPLICATION OF PDA AND LDA TECHNIQUES IN MEASUREMENT FOR PHYSICAL CHARACTERISTICS OF BUBBLE-LIQUID FLOW

Zhou Ming Li Wencai

*(Central Iron & Steel Research Institute)*

**Abstract** A Particle Dynamics Analyzer (PDA) is employed to measure the velocity and diameter of bubbles (measurement ranges between 0—5 m/s and 0—15 mm), the liquid velocities in liquid circulation zone and in bubble-water plumes are measured in two dimensions by using a Laser Doppler Anemometry (LDA) technique. It is shown that the diameter of bubbles is almost a constant at different levels in the vessel. The radial distribution of velocity of bubbles and liquid in two-phase plumes is found to be well represented by a Gaussian function.

**Key words** two-phase flow, bubbles, Laser Doppler Anemometry, Particle Dynamics Analyzer