

研究简报

## 粒子成像测速法测定沉降槽内颗粒群 的速度场

李鑫钢\* 杜英生 余国琮

周 革

(天津大学化学工程研究所, 天津300072)

(天津大学精密仪器系)

关键词 激光粒子 成像测速法 沉降槽 颗粒群

### 1 引 言

在化工、环保、选矿等领域中,经常遇到大量的颗粒沉降问题。颗粒的沉降速度是两相流动中重要理论基础之一。测量单颗粒的沉降速度很容易,但对颗粒群很难测出其中每个粒子的速度,而实际过程大都涉及颗粒群。

对于沉降槽内的颗粒运动,一般按理想槽处理,不考虑流动不均匀及颗粒群的真实沉降速度,以及它们对夹带的影响<sup>[1]</sup>;或者用间歇沉降试验数据设计沉降设备<sup>[2,3]</sup>。本文的目的就是测量沉降槽内分区域颗粒群的统计平均速度,以期对沉降过程的研究和设计提供帮助。

### 2 粒子成像测速装置

#### 2.1 两相流测速

皮托管可以测量两相均匀流动,但不能测量粒子群的流速场。激光多普勒流速法<sup>[4-6]</sup>是利用光学差拍及干涉技术,测量移动物体散射光的多普勒频移。该方法对流场干扰小,但价格昂贵,调试困难,对于点速度的测量有效,而测量大面积粒子场需多点扫描,费时费力。光学照像法<sup>[7]</sup>采用具有间歇性的延时摄影技术测量粒子的速度,该法工作量太大,对浓度稍高的粒子群几乎无法测量。本文报道一种实用的大面积粒子测量新方法,即粒子成像测速法<sup>[8]</sup>。

#### 2.2 粒子成像测速系统原理

粒子成像测试法(以下简称PIV)分两步。第1步见图1。激光器发出的光束经扩束镜、准直透镜扩展为平行光束,照明测试单元的粒子场。用物镜接收粒子的前向散射光,并将粒子成像在底片上。若底片上记录的是粒子多次曝光的像,则运动粒子相邻两次曝光成像位置之间的间隔为

$$\Delta S = v \cdot \Delta t \cdot M \quad (1)$$

$\Delta t$ 通常是通过光源的控制来实现,本实验中 $\Delta t$ 是由光脉冲调制系统实现的。放大倍率 $M$ 由测量标尺确定。

PIV的第2步是对所记录的底片进行判读和分析,见图2。

将底片放置在1束细光中,底片由1个可在 $xy$ 平面内移动的支架支撑。用细光束对底

1991-08-30收到初稿,1991-11-30收到修改稿。

\* 通讯联系人。

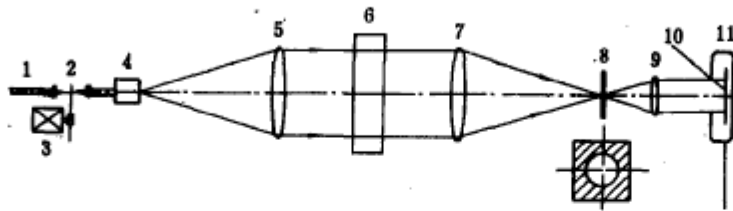


图1 前向散射PIV测试系统

1—激光束；2—光脉冲调制器；3—马达；4—扩束镜；5—准直透镜；6—测试单元；7—汇聚透镜；8—通带滤波器；9—物镜；10—底片；11—照相机

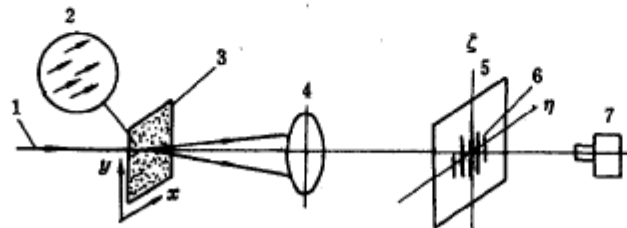


图2 底片判读系统及条纹分析原理

1—探测光束；2—照明域；3—多曝光底片；4—变换透镜；5—条纹接收屏；6—干涉条纹；7—摄像机

片进行扫描分析。在底片的后面放1个变换透镜，透镜的后焦面上放1个接收屏。接收屏上将显示出由底片上被光束照射处的相关粒子群之间因干涉而产生的等间距的杨氏干涉条纹，这种变换是一种光学傅氏变换。条纹的取向与粒子群移动的方向相垂直，条纹的间隔反映的就是被光束照射处粒子群统计平均速度的大小，细光束的直径可以调节。令条纹间距为 $\delta$ ，

则

$$\Delta S = f \cdot \lambda / \delta \quad (2)$$

由式（1）和式（2），可得粒子移动速度为

$$\Delta v = f \cdot \lambda / (\Delta t \cdot M \cdot \delta) \quad (3)$$

对底片的扫描需要一个自动分析系统，由摄像机和计算机组成。摄像机把条纹信号送入计算机，进行分析存贮，并控制平台移动，完成预定的扫描点数，最后由计算机输出分析结果。由于计算机

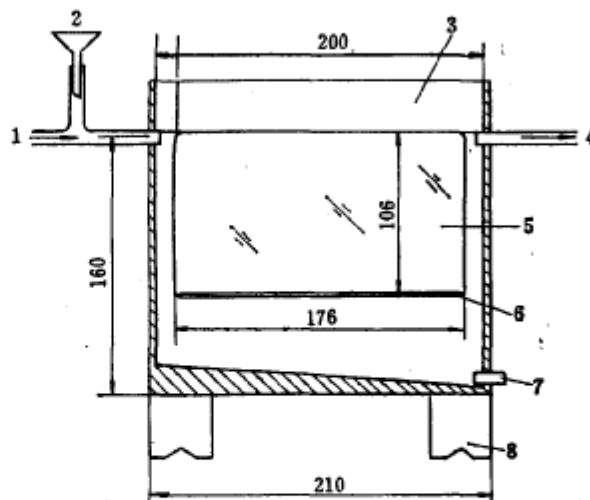


图3 沉降实验装置

1—进水口；2—漏斗；3—沉降槽；4—出水口；5—玻璃窗；6—标尺；7—排沙口；8—底座

只判断条纹的 2 个参数,故速度快,容量少。

### 2.3 光脉冲调制系统

光脉冲由带孔的圆盘和马达实现调制。通过改变电压,就可以实现脉冲光的调制。由实验测定电压与马达转速的关系,回归式为

$$n = -10.747 + 13.184V \quad (1.0 \leq V \leq 12.0) \quad (4)$$

对于单孔圆盘,光脉冲时间间隔即为转速的倒数。

### 2.4 沉降实验装置

为便于照明,图3所示的沉降实验槽开有玻璃窗。当达到稳定流动后,直径为 150~180 $\mu\text{m}$ ,相对密度为 2.3 的细玻璃微珠由漏斗加入,沉降槽内随即形成了粒子群沉降场。激光光束经扩束后扩展为  $\phi 120$  的圆柱光束,照射粒子场。由光脉冲调制系统及照相机快门的动作,就可以取出粒子场的多曝光像。

## 3 沉降槽内粒子群速度测量结果

用上述的测速装置测定了沉降槽内粒子群的速度场,操作条件列于附表中。按理想沉降槽模型<sup>(1)</sup>,可求得该粒径范围下,不夹带的临界流率为 360.0 L/h。

沉降槽操作条件及物料性质

| 连续相: 水       |                                |                                    |                                               | 分散相: 玻璃微珠       |                                    |
|--------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| $T/\text{K}$ | $Q/\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ | $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | $\mu/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ | $d/\mu\text{m}$ | $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| 295.65       | 51.0                           | 997.6                              | $9.469 \times 10^{-4}$                        | 150~180         | 2300                               |
| 295.15       | 54.3                           | 997.7                              | $9.579 \times 10^{-4}$                        | 150~180         | 2300                               |



图 4 粒子群多曝光像 ( $M=0.329$ ,  $t=0.0285\text{ s}$ )

图4为激光照射下粒子场多次曝光的像。图5为图4底片的再现干涉条纹。条纹再现时,先将多曝光底片分为84个区域,然后对每个区域进行再现,相当于用光学傅氏变换法将像变换为条纹,每个区域的条纹信息,代表了该区域内粒子群的统计平均速度。这种光学变换是

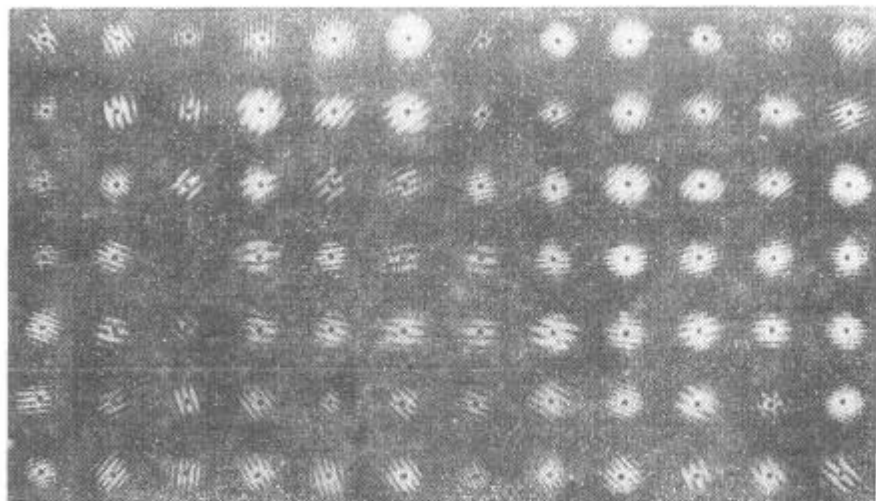


图5 多曝光像再现条纹

非常有意义的, 因为测量每个颗粒的速度是非常费时且不可能的, 群体的统计速度才有意义。图6为条纹的测试结果。由图6可见, 速度分布与理想沉降槽有显著偏离。

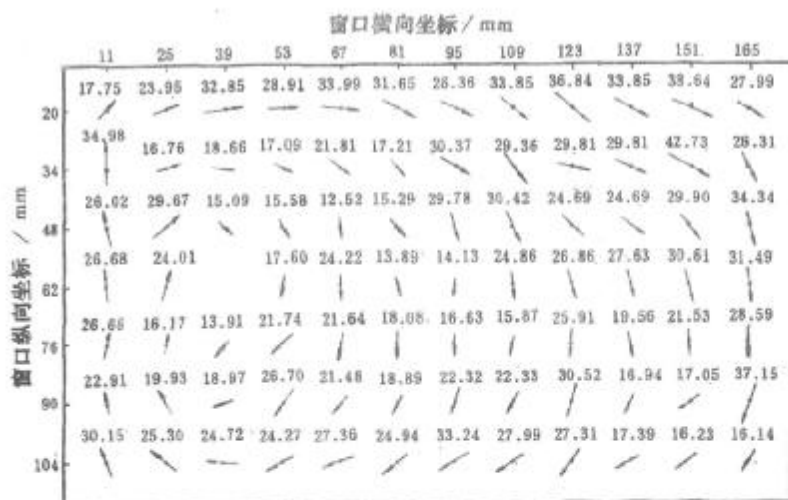


图6 粒子群的速度分布 (mm/s)

#### 4 结 论

本文用粒子成像测速方法, 根据光学相干原理, 测量了沉降槽内各区域粒子群的统计平均速度场。测试表明, 该方法是测量粒子场速度分布的一种有效方法。

## 符 号 说 明

|                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| $d$ ——粒径, mm       | $T$ ——温度, K                 |
| $f$ ——焦距, mm       | $t$ ——曝光时间间隔, s             |
| $M$ ——放大倍率         | $V$ ——电压, V                 |
| $n$ ——转速, $s^{-1}$ | $v$ ——粒子群统计平均速度, mm/s       |
| $Q$ ——流率, L/h      | $\lambda$ ——波长, $10^{-10}m$ |
| $S$ ——粒子多曝光像间隔, mm |                             |

## 参 考 文 献

- 1 佟庆理. 两相流动理论基础. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 43~87
- 2 L. 斯瓦洛夫斯基. 固液分离. 北京: 原子能出版社, 1982. 113~123
- 3 吉野善弥. 湿法冶金, 1982(1): 49~57; (2): 59~66
- 4 盛森芝, 沈熊, 舒伟. 流速测量技术. 北京: 北京大学出版社, 1987
- 5 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学. 北京: 化学工业出版社, 1988: 623~625
- 6 Drain L E. The Laser Doppler Technique. New York: John Wiley Sons, 1980
- 7 张远君, 王慧玉, 张振鹏编译. 两相流体力学. 北京: 北京航空学院出版社, 1987. 522~525
- 8 Adrian R J. Int J Heat Fluid Flow, 1986, 7(2): 127~144

## VELOCITY FIELD MEASUREMENT OF PARTICLE SWARM IN A SETTLER BY PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

Li Xingang, Du Yingsheng  
and Yu Guocong (K.T.YU)

(Chemical Engineering Research  
Center, Tianjin University, Tianjin 300072)

Zhou Ge

(Department of Precision Instrument  
Engineering, Tianjin University)

**Abstract** The statistical mean velocities of particle swarm in several regions of a settler were measured by using a method in such a way that the multi-exposure images were taken by Particle Image Velocimetry, then the films obtained were analyzed by optical Fourier transform to produce Young's fringe. The success of this experimental method was demonstrated by obtaining the velocity field of particle swarm in a settler, which may contribute significantly to the further understanding of the settling process.

**Keywords** Laser Particle Image Velocimetry, settler, particle swarm