

文章编号 : 1007 - 1482( 2006 )01 - 0045 - 04

· 论著 ·

## 颗粒成像特性的研究

刘双科, 王建飞, 朱彩兰, 单明, 杨彩青

( 北京科技大学热能工程系, 北京 100083 )

**摘要:** 本论文针对流场颗粒成像测量, 通过对二维颗粒场成像图像的像点灰度分布、像点直径以及光照强度的影响等进行了研究, 提出了流场像点图像的颗粒成像特性分析方法。基于像点直径的概念, 推导了颗粒成像法测量颗粒场时的最大极限浓度估算公式。

**关键词:** 颗粒; 颗粒成像特性; 定量图像分析

**中图分类号:** TG115.2

**文献标识码:** A

## Study on Imaging Characteristics of Particles in Two-dimension flow

LIU Shuangke, WANG Jianfei, ZHU Cailan, SHAN Ming, YANG Caiqing

( University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China )

**Abstract:** Imaging characteristics of particles were analyzed in two-dimension simulative flow fluid by quantitative image analysis, and obtained characteristics of image point in gray distribution, diameter, influence of illuminance. Analytical method was set up to multi image point of imaging particles. Base on the concept of image point diameter, formula was obtained to estimate concentration limit when particle-imaging technique was used for measuring particulate flow.

**Key words:** particle; imaging characteristics; quantitative image analysis

颗粒或粉体, 有别于同类物质的固态、液态及气态, 虽然属于固体, 却具有流动性、分散性和高比表面。随着纳米材料的异军突起, 更加引起人们对颗粒表征技术的关注和研究。所谓颗粒表征, 是指对颗粒几何特性的分析测量。图像分析法, 作为颗粒表征的方法之一, 已经被列为颗粒表征的标准化方法之一<sup>[1]</sup>。

PIV 技术或 PTV 技术, 是以图像技术为基础的光学测量方法, 是目前典型的流动测量的新技术。与静止颗粒图像分析方法相比, 流场中流动颗粒成像测量受到流场条件和光学成像条件限制, 颗粒成像特性更加复杂。例如, PTV 技术<sup>[2]</sup>应用于大颗粒气—固两相流测量时<sup>[3]</sup>, 颗粒成像特性直接影响到颗粒流动特性测量精度。

本文在不同光照条件下, 进行了二维颗粒场的

成像实验。并采用定量图像分析方法, 对颗粒成像特性进行研究。

### 1 颗粒成像实验及颗粒像点直径

#### 1.1 颗粒成像实验

颗粒成像实验布置示意图, 如图 1 所示。为了突出气固流场的二维性, 用喷雾胶把颗粒随机粘贴在平面透明玻璃上, 形成模拟二维流场。实验用颗粒大小均一, 直径为 600  $\mu\text{m}$ 。拍摄现场在室外晴朗的白天利用日光照明进行, 拍摄时间依次为 12 点、13 点、14 点、15 点、16 点和 17 点。实验用相机型号为 KODAK LS633。图 2 是在 17 点日光拍摄的颗粒图像例, 图像的放大率和空间分辨率, 分别为 2.06 和 0.074 mm/像素。

收稿日期: 2005 - 04 - 13

作者简介: 刘双科, 博士, 北京科技大学副教授

研究方向: 多相流, 流场图像分析与处理, E-mail: liusk@me.ustb.edu.cn

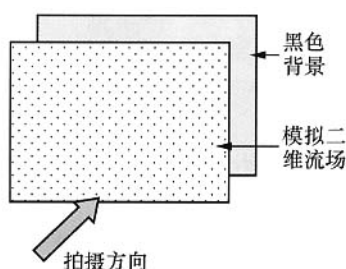


图1 实验布置示意图

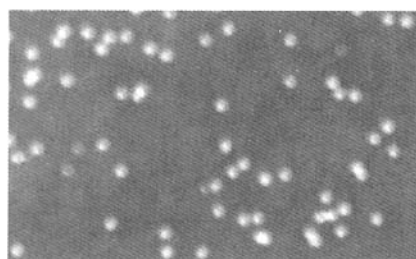
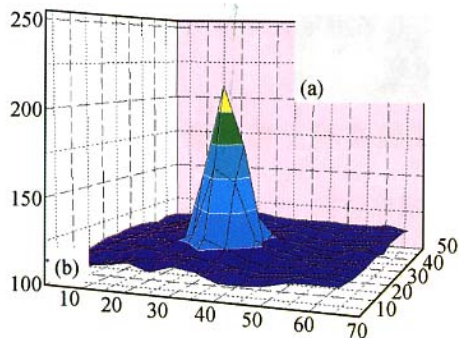


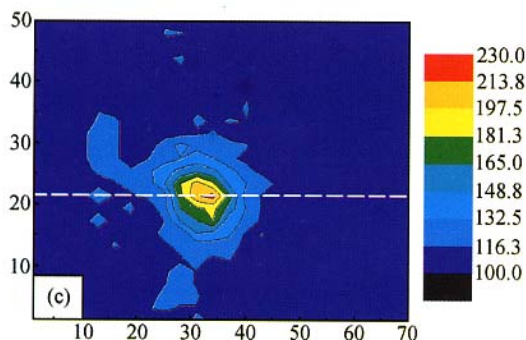
图2 晴天 17 点日光拍摄图像例

## 1.2 颗粒像点直径的定义

成像颗粒的像点形状,多数情况下为点形或者圆形。在颗粒像点识别过程中,如直径、面积、周长等几何特征是颗粒识别所需的关键参数。像点图像就是颗粒反射和投射的光强度分布,在固定光源均匀照射下的颗粒场,颗粒像点大小和光强度分布应该是一定的,那么像点大小是多少,从图3中的(a)图,即黑色背景中的白色部分,很难确定其大小。图3



图(b) 图(a)的三维灰度分布



图(c) 图(a)的灰度等值线

图3 单像点的灰度分布

中的(b)和(c),分别是该像点的三维灰度分布和灰度等值线分布,可看出像点和背景色之间有明显的灰度梯度存在。为了便于叙述,进一步把图3的(c)中的虚线所示位置的二维灰度分布在图4中表示出来。其中,图4中的符号,黑方形表示灰度分布,实线为FFT拟合曲线。然后,把图4中拟合曲线的顶点用A表示,与背景灰度水平线相交的两个点分别用B点和C点表示,并表示在图5中。如图5所示,把B点与C点的连线长度 $D_p$ 定义为像点直径。同时,用 $h_G$ 表示像点最大灰度值与背景灰度级水平的差值,对于同一背景的像点 $h_G$ 简称为最大灰度值。

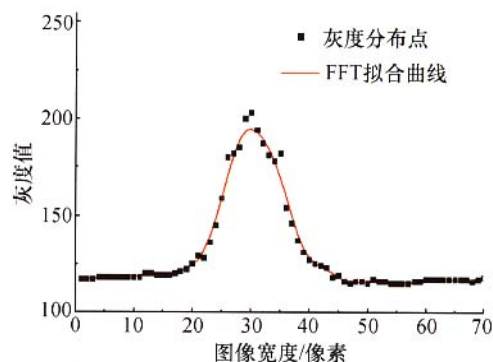


图4 像点的灰度分布

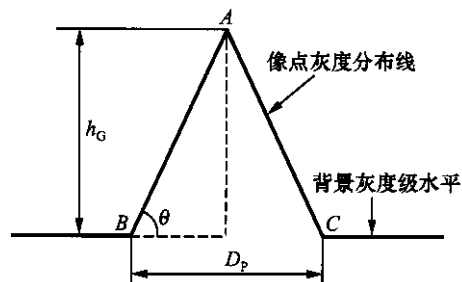


图5 像点直径的定义示意图

## 2 颗粒的成像特性

### 2.1 单颗粒的成像特性

图6是像点直径和最大灰度值与照明强度的关系图。图6中的像点直径的值,在二维灰度分布图(例如图4)中,按像点直径的定义,可以直接得到像点直径长度(像素数)。图中的横坐标的光照度表示,根据已知12点的光照度是 $10^5$ 克斯,17点的光照度是1克斯,假定从12点到17点光照度按指数规律衰减。如图7所示,随着照明强度的减弱,像点最大灰度快速降低,相反地,像点直径缓慢增大。这一结果,在图7中也有相同结果显示。图7是同一颗粒在不同照明条件下5帧图像中的像点灰度分布。从颗粒识别的角度考虑,照明光越强,像点灰度

的峰值越大,越容易识别,相反地,照明强度越弱,像点最大灰度值与背景灰度的差值越小,即像点反差变小,使得颗粒不易识别。

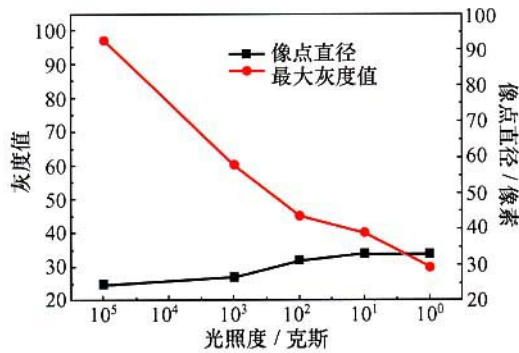


图6 像点直径、最大灰度值与照明强度的关系

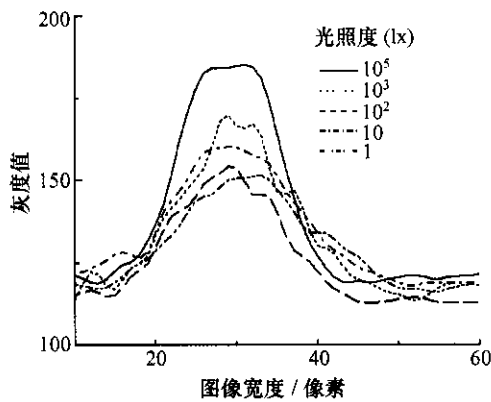


图7 照明强度与像点灰度分布的关系

## 2.2 多颗粒的成像特性

考虑颗粒像点图像中相邻像点的空间关系,比较相邻像点与像点之间的距离 $\delta$ 与像点直径 $D$ ,类似于图8所示的瑞利判据的分辨条件,可以分为三种情况,Ⅰ  $\delta < D$ ,Ⅱ  $\delta = D$ ,Ⅲ  $\delta > D$ 。

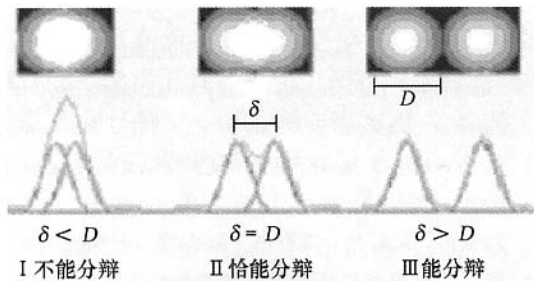


图8 瑞利判据的分辨条件

首先,考虑像点识别较为简单的第Ⅲ类情况,即图像中所有相邻像点之间都满足 $\delta > D$ 时的条件,如图9所示。对于此类图像,相邻像点识别与分辨不成为问题,问题是该图像中所有颗粒的成像特性是否相同,如果相同我们就可以用一个阈值一次识别所有像点,从而保证最大的像点识别率。颗粒的成

像特性,取决于图像采集时的光照均匀度、颗粒粒径等。图10是在同一图像中,随机选择的不同像点的最大灰度值和像点直径。如图所示,像点图像中不同位置的不同像点的像点直径和最大灰度值趋于一个恒定值。这表明流场中所有颗粒的成像特性比较一致。对于颗粒成像特性比较一致的像点图像,并满足相邻像点距离 $\delta$ 大于像点直径 $D$ 时,我们就可以用一个阈值一次性识别所有像点。因此分析颗粒成像特性在选定二值化阈值和保证高识别率时十分必要。

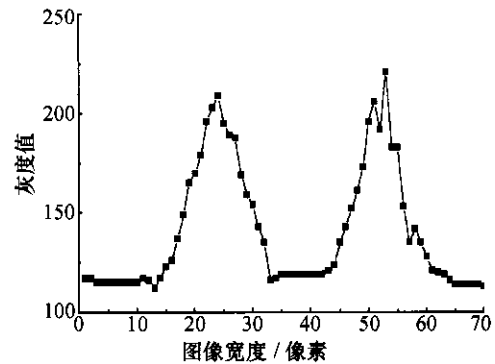


图9  $\delta > D$  的相邻像点灰度分布

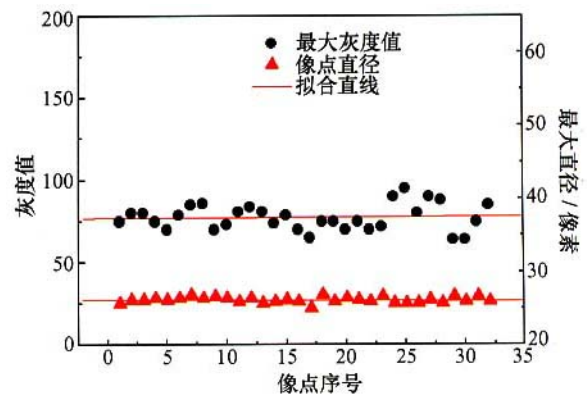
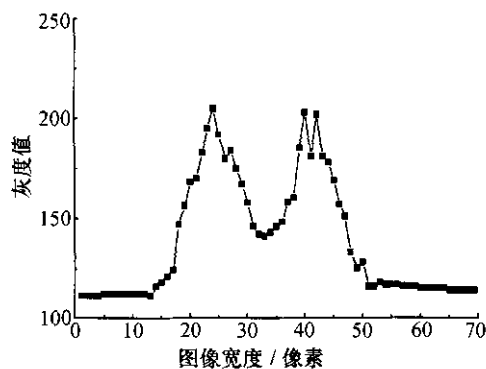
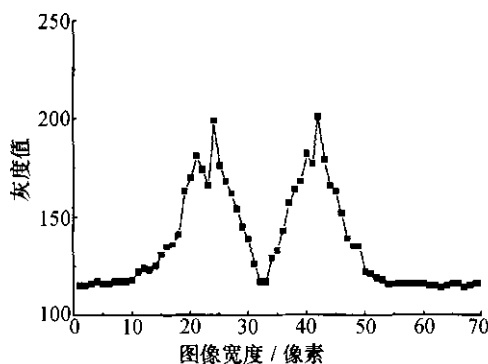


图10 不同像点最大灰度值与像点直径

其次,考虑比较复杂的第Ⅰ和第Ⅱ类情况,  $\delta < D$  和  $\delta = D$  的两种情况如图11和图12所示。由于瑞利判据中的像点图像是发生衍射时的像点图像,其像点灰度分布规则性较强,而本文所研究的像点图像,是颗粒散射形成的,具有泊松亮点特征的像点图像<sup>[3]</sup>,其像点灰度分布规则性差,表现为像点直径大以及最大灰度分布峰值较小。因而,在 $\delta < D$ 的情况下,特别是对于粒径较大颗粒像点,利用图像法识别相邻像点较难。作者认为,瑞利判据的第Ⅱ种情况,是采用图像法测量流场颗粒分布时的相邻像点极限位置。因此,颗粒成像测量法在第Ⅱ和第Ⅲ类情况下采用。

图 11  $\delta < D$  的相邻像点灰度分布图 12  $\delta = D$  的相邻像点灰度分布

### 2.3 颗粒成像测量法的限界浓度

基于颗粒成像特性,对相邻颗粒的像点识别条件进行了分析,结果说明,应满足颗粒之间的距离  $L$  与像点直径  $D$  的关系,根据分辨率条件  $L \geq D$ 。

假设像点中心与颗粒几何中心位置相同<sup>[3]</sup>,则像点的分布,实际上就是颗粒在空间的分布。对于局部均匀颗粒场,或者均匀颗粒场,颗粒之间的距离反映了流场的颗粒浓度大小。假定颗粒为圆形时,可以通过简单的数学运算,得到浓度与均匀流中颗粒之间距离  $L$  的关系式。并用  $C_v$  代表颗粒浓度。即

$$\frac{d}{L} = \left( \frac{6}{\pi} C_v \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

根据分辨率条件,  $L^* \geq D$ ,  $L^*$  是  $L$  的像长度。当  $L^* = D$  时,有

$$\frac{d}{D} = \left( \frac{6}{\pi} C_v \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

引入图像的放大率  $K$ ,则

$$\frac{1}{K} = \left( \frac{6}{\pi} C_v \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

所以,颗粒成像方法测量颗粒场的最大极限浓度  $C_v$ ,有

$$C_v = \frac{\pi}{6K^3}, \quad (4)$$

(4)式表明,在局部均匀或者均匀颗粒场,颗粒成像方法测量颗粒场的最大极限浓度  $C_v$ ,只与放大率  $K$  有关。(4)式的意义表明,流场颗粒浓度在小于最大极限浓度  $C_v$  时,可以采用颗粒成像方法测量颗粒场;流场颗粒浓度在大于最大极限浓度  $C_v$  时,不应该采用此方法。根据(4)式及本实验的放大率,算出的最大极限浓度  $C_v = 0.05987$ 。

### 3 结论

本论文针对流场颗粒成像测量问题,通过二维流场颗粒像点图像的分析,对像点灰度分布、像点直径等颗粒成像特性进行了研究,得出了以下结论。

① 单颗粒的成像,随着照明光源的光照度减弱,像点灰度分布峰值迅速减小,同时像点直径增大;多颗粒的成像,也有同样的特性。

② 颗粒成像特性分析,可以提供统计意义上的像点识别特征值,有助于多像点图像、以及多像点多帧图像的颗粒像点识别。

③ 基于像点直径的概念,推导了在局部均匀或者均匀颗粒场,颗粒成像方法测量颗粒场的最大极限浓度的估算公式(4)。

### 参考文献:

- [1] 许人良. 现代颗粒表征技术的最新发展综述[J]. 化工冶金(增刊), 1999, 20: 592-597.
- [2] Shuangke Liu, Xuchang XU, Guoqiang Deng and Fuji Yamamoto. Experimental Study on Characteristic of Particles at Exit Zone in CFBB by PTV[C]. Proceedings of the Meeting of Japan Society of Mechanical Engineering. 2001, 229.
- [3] 刘双科,朱彩兰,祁海鹰,徐旭常. 图像技术在循环流化床锅炉出口域浓度测量中的应用[J]. 中国体视学与图像分析, 2004, 9(2): 99-103.