

光阻积分式颗粒粒度测试方法的模拟研究

简森夫, 王清华, 张少明

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:对传统光阻式颗粒计数器的计数方法进行了改进,采用积分统计的方法进行颗粒计数,研究了信号阈值的选取,以及信号噪声和颗粒脉冲信号的重叠对粒度分布求解的影响。数值模拟表明,在整个粒径范围内,求解结果对噪声不敏感,颗粒信号重叠程度加大,粒度求解结果在测量范围的上限的偏差加大,但对于中部和下限的粒度重合程度非常好。

关键词: 光阻;积分式;粒度测试;数值模拟

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1008-5548(2003)06-0026-04

Research on Particle Size Analysis by Optical Blockage Integral Method

JIAN Miaofu, WANG Qinghua, ZHANG Shaoming

(School of Material Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The traditional optical blockage particle size counter is improved. The selection of signal threshold and the effect of overlap of signal noise and pulse signals on calculating the particle size distribution are discussed. With the integral analysis method within the range of all particle size, the instrument can resist more noises, and its background can be easily subtracted. When the overlap of particle signals increases, the deviation of the maximum limit of particle size is big, but the middle size and the minimum limit of particle size coincide well with the actual particles.

Key words: optical blockage; integral method; particle size analysis; numerical simulation

随着粉体加工在工业生产中的规模越来越大,粒度在线测量是提高产品质量和降低生产成本的十分有效的措施。目前可用于粒度分布在线测试的方法只有采用光角散射和超声波扫描法,这些方法由于设备复杂、价格高和对环境要求高等原因,在实际生产中难以推广。

光脉动法是测量平均粒度的一种行之有效的办法,设备相对简单,易于推广。但实际生产中往往希望控制粒度的上限,这种较简易的测量方法往往不能适应。为此,通过进一步降低颗粒悬浮液的浓度、减小光束的截面积等方法,使之转变为光阻式颗粒计数器。但计数器的缺点是测量结果受到测量噪声干扰时误差较大。本文研究了采用积分统计代替计数的改进,数值模拟表明,该法使仪器的测量抗干扰能力增强,具有良好的应用前景。

1 测量原理

1.1 光阻式颗粒粒度测试系统

如图1所示,为光阻式颗粒测量的原理示意图。被测颗粒的悬浮液以恒定的速度流过横截面很小的通道,通道壁有一光阑,聚焦光束的穿过该光阑,通过傅里叶透镜被光敏二极管接收,经过信号处理输入计算机进行数据处理。聚焦光束与光阑即构成了仪器的测量区或敏感区,如果某一时刻流过测量区的液体没有颗粒,则光敏二极管给出的信号为一恒定的电流值;相反,如果有一颗颗粒流经测量区时,由于颗粒的遮光效应,光敏二极管给出的将是一脉冲信号,脉冲信号的幅值和面积与颗粒粒径的大小有一定的关系。

通常脉冲信号的幅值正比于颗粒对光束的遮光面积,这是建立在颗粒遮光服从几何光学的假定之上的,这时光敏二极管给出的脉冲信号 I 为^[1]

$$I = \frac{a}{A} I_0$$

式中, I_0 为无颗粒时光电信号的恒定值; a 和 A 分别是颗粒的遮光面积和光阑的等效面积。更严格地讲,

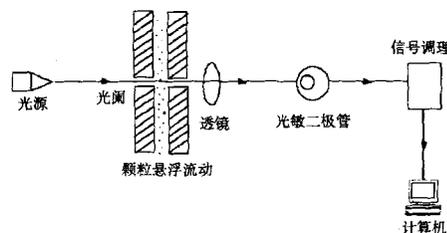


图1 测量系统示意图

收稿日期:2003-03-07,修回日期:2003-09-27

第一作者简介:简森夫(1954-),男,硕士,副教授。

颗粒测试

信号的变化是由于细小颗粒对光的散射和吸收,即消光引起的,将(1)式改写为^[2]

$$I = I_0(1 - e^{-\frac{a}{\lambda}K_e})$$

式中, K_e 为消光系数,由 Mie 氏散射理论计算得到^[3]。对光脉冲的幅度或面积测试可以得到粒度分布的全部信息。

1.2 颗粒脉冲信号函数

对脉冲信号的进一步研究发现,不但脉冲的幅值与颗粒的大小有关,而其脉冲的形状与颗粒大小有着明确的数学关系,图 2 所示的是粒径大于光阑宽度的颗粒通过光阑时产生脉冲信号的原理示意图,图 3 所示的是粒径小于光阑宽度的颗粒通过光阑时产生脉冲信号的原理示意图。

对于图 2 情形:若一球形颗粒以速度 v 通过光阑,颗粒与光阑的相对位置随时间从 P_s 变化到 P_e 形成一个完整的脉冲, P_c 位置对应于颗粒一侧即将移出光阑, P_b 位置对应于颗粒中心与光阑中心重合而产生脉冲的极大值。此时(1)、(2)式中的颗粒遮光面积 a 在一个信号脉冲内随时间的变化,可以用分段函数的形式给出:

$$a = r^2 a_1 - (r-x) \sqrt{2rx-x^2}; \quad P_s \quad P_c \quad (3)$$

$$a = r^2 (a_1 - a_2) - (r-x) \sqrt{2rx-x^2} - (r-x+c) \sqrt{r(x-a)-(x-a)^2}; \quad P_c \quad P_b \quad (4)$$

其中: t 为时间, $x = vt$; c 为光阑宽度,

$$a_1 = \arccos \frac{r-x}{r}, \quad a_2 = \arccos \frac{r-x-c}{r}$$

而 $P_b \quad P_e$ 段与 $P_s \quad P_b$ 段的脉冲函数是对称的。

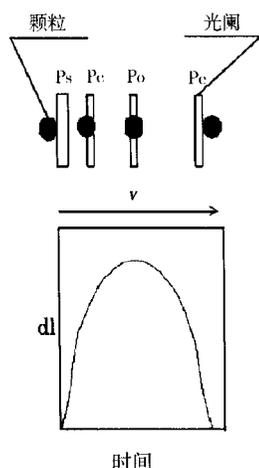


图 2 较大颗粒经过光阑产生的脉冲

对于图 3 情形:类似地,若一球形颗粒以速度 v

通过光阑,颗粒与光阑的相对位置随时间从 P_s 变化到 P_e 形成一个完整的脉冲, P_c 位置对应于颗粒完全进入光阑内, P_c' 位置对应于颗粒即将开始离开光阑。此时(1)、(2)式中的颗粒遮光面积 a ,亦可以用分段函数的形式给出:

$$a = r^2 a_1 - (r-x) \sqrt{2rx-x^2} \quad P_s \quad P_c \quad (3)$$

$$a = r^2 \quad P_c \quad P_c' \quad (5)$$

其中 $P_s \quad P_c$ 段,遮光面积 a 的函数形式等同于图 2 情形,各参数的含义同图 2,而 $P_c \quad P_c'$ 段与 $P_c' \quad P_e$ 段脉冲函数是对称的。

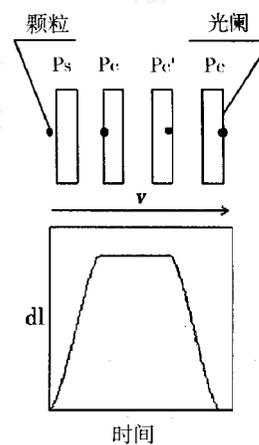


图 3 较小颗粒经过光阑产生的脉冲

1.3 光阻积分式颗粒粒径统计方法

如图 4 所示,不同粒径的颗粒产生不同的信号脉冲。图中纵向数字 1,2,3,...,n 表示信号积分时所取的信号阈值线,横向数字 1,2,3,4,... 表示 n 个粒级的代表经。用单下标 E_i 表示阈值线 i 上的总的信号积分值。双下标 $E_{i,j}$ 表示 j 粒级代表经在阈值线 i 上的信号积分值。则有

$$E_i = K_{i,1} E_{1,1} + K_{i,2} E_{2,2} + \dots + K_{i,k} E_{k,k} + \dots + K_{i,i-1} E_{i-1,i-1} + E_{i,i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

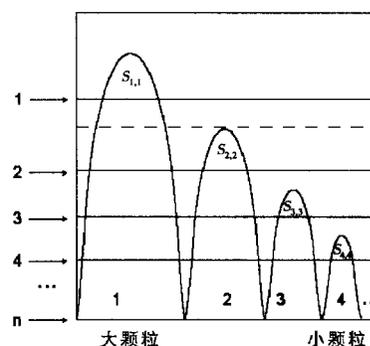


图 4 颗粒脉冲信号阈值积分原理示意图

颗粒测试

其中 $K_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{S_{j,j}}$ $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$; $S_{i,j}$ 表示 j 粒级代表经的单个颗粒脉冲在阈值线 i 上的信号积分值。

(6) 式用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ K_{2,1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ K_{3,1} & K_{3,2} & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n,1} & K_{n,2} & K_{n,3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{2,2} \\ E_{3,3} \\ \vdots \\ E_{n,n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7) 式可简写成向量形式:

$$E = K \cdot E \quad (8)$$

式中, E' 为 E 阵的转置, 则粒度分布向量 W 可表示为

$$W = E' \cdot S = (K^{-1} \cdot E)' \cdot S \quad (9)$$

其中, $W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}$, $S = \begin{bmatrix} S_{1,1} \\ S_{2,2} \\ S_{3,3} \\ \vdots \\ S_{n,n} \end{bmatrix}$, \cdot 为点除符号,

表示向量各对应元素相除。

在实际测量中, 可对脉冲信号进行快速采样, 按照一定的阈值对脉冲信号进行积分运算, 得到向量 E 。系数矩阵 K 和脉冲向量 S 是可以预先由计算机算出, 根据式 (9) 算出颗粒粒度分布。

2 数值模拟

为考察该颗粒测试方法的可行性, 首先对此进行数值模拟。将仪器的测量范围设定在 $1 \sim 120 \mu\text{m}$ 。模拟中设定光阑长为 $150 \mu\text{m}$, 宽为 $10 \mu\text{m}$ 。颗粒悬浮液流经测量区的速度为 50 mm/s , 信号采样时间间隔为 $1 \mu\text{s}$, 模拟中假定颗粒服从 RR 分布^[4]。理论上应计算所有粒径的颗粒脉冲信号, 实际操作中可取 $100 \sim 200$ 个粒级计算相应的颗粒脉冲信号, 再根据颗粒脉冲信号进行阈值积分, 最后由式 (10) 求出在 30 个离散化粒级区间上的粒度分布。

2.1 信号阈值线的选取

(8) 式中系数矩阵 K 的计算离不开阈值线的选取。信号阈值线选取应考虑两方面因素 (图 4): 首先使得相邻阈值线中的脉顶信号有效地代表该脉冲所对应的粒级; 其次使得矩阵 K 的条件数小, 以利于求解稳定。

单从前者考虑: 可使得阈值线为各粒级的下限所对应的信号脉冲峰值, 但此时发现系数矩阵 K 的条件数达到 10^{15} , 使求解不稳定。如图 5 所示, 通过高斯

列主消元法求解的粒度分布出现剧烈的振动, 甚至出现无物理意义的负值。

单从后者考虑: 对系数矩阵 K 的考察发现它的对角线上的元素全为 1, 上三角元素全为 0, 下三角的元素全大于 1。下三角的大于 1 的元素在一定程度上反映了此矩阵偏离对角占优阵的程度。通过增大信号的脉顶面积, 即下移阈值线 (如将图 4 中的 1 号阈值线最多移至图中虚线处, 其它依此类推), 可使下三角的元素的数值减少。图 6 所示为信号阈值线为各粒级代表经所对应的脉冲峰值时的求解, 此时的条件数为 10^3 。即便运用高斯列主消元法求解, 就能求得稳定的解, 各粒级粒径设定值与求解值相差不超过 0.3%。后面这种取阈值线的方法可能使得求出的粒径发生偏差, 但在这里设定值和求解值非常吻合, 在这里误差补偿定理起很好的作用。在下面的模拟和实测中, 将全部采用此阈值线的选取方法。

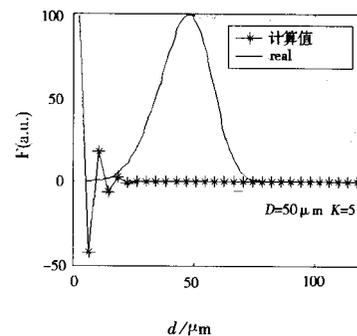


图 5 阈值线为各粒级的下限所对应的脉冲峰值时的求解

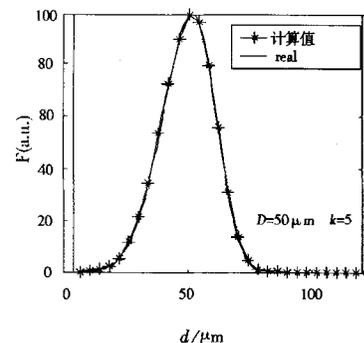


图 6 阈值线为各粒级代表经所对应的脉冲峰值时的求解

2.2 信号噪声对粒度分布求解的影响

图 7 给出了脉动信号所带噪声分别为 5%, 10%, 15% 和 20% 时的模拟求解结果。设定条件相同, 设定颗粒粒度分布服从 RR 分布: $\bar{D} = 50 \mu\text{m}$, $K = 5$ 。从图中看出, 随着噪声的增大, 求解值与初始设定值的差别越来越大。当噪音为 5%, 10%, 15%, 20% 时, 各粒

级粒径设定值与求解值最大相差值分别为 1.1%, 1.6%, 4.4%, 12%。

从整个粒径范围来讲, 求解结果对噪音不敏感, 该颗粒粒径统计方法具有较强的抗噪声能力, 这是通常的计数器法统计粒径难以达到的。

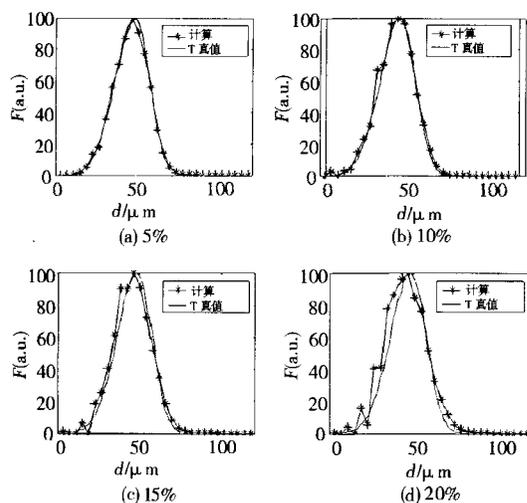


图 7 不同噪声下的求解结果

2.3 颗粒脉冲信号的重叠对粒度分布求解影响

在实际测量中, 当两个颗粒相邻太近, 会产生信号重叠的现象, 以至于系统误认为有一个大颗粒存在。这种由于颗粒的过分靠近造成较大颗粒的假象在其它粒度测试方法中也是不可避免的。为考察颗粒重叠现象对积分式颗粒粒径统计方法的影响, 需要对此现象进行模拟。具体模拟中在各粒级挑一定比例的信号脉冲随机叠合。图 8 设定颗粒粒度分布服从 RR 分布, $D = 50 \mu\text{m}$, $K = 5$ 。图中 (a) 假设有 5% 的信号发生重叠, 图中 (b) 假设有 10% 的信号重叠。计算表明, 随着颗粒信号重叠程度的加大, 粒度求解的结果的偏差加大, 而这种偏差主要集中在测量范围的上限, 对于

中部和下限的影响是微乎其微的。从总体上看, 其偏差并非很大。究其原因, 应有两方面: 一是该法将信号值对时间积分, 这样叠加信号的积分值占总的权重并不大; 二是对于中部和下限的粒级重合程度非常好, 因为积分逐次扣除的补偿效果比较好。

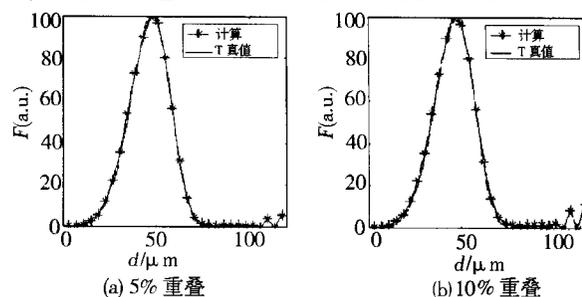


图 8 颗粒脉冲信号的重叠对粒度分布求解影响

3 结束语

本文提出的光阻积分式颗粒粒度测试方法是对传统的光阻式颗粒计数器的一种改进。数值模拟表明: 这种积分式颗粒粒度统计方法有着很强的抗噪声能力, 测量系统的本底噪音易扣除, 对于个别颗粒粘联造成测量结果偏大效应不明显。现在快速数据采集卡的出现, 使得本文模拟中的 10^6 Hz 的采样速率轻易可以实现, 有望将该种测试方法用于在线颗粒分布测定。

参考文献:

- [1] 艾伦 T. 喇华璞等译. 颗粒大小测定[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [2] Knapp J Z, Barber T A, Lieberman A. Liquid and Surface Borne Particle Measurement Handbook[M]. Marcel Dekker Inc, 1996
- [3] Van de Hulst H C. Light Scattering by Small Particle[M]. New York: John Wiley & Sons, 1957.

信息之窗

欢迎订阅《工业矿物信息》

《矿物信息》是中国非金属矿工业进出口公司与武汉理工大学联合主办的经济技术信息报, 主要报道当前非金属矿产的最新进展、新产品、新技术及新设备; 国内外主要矿种的产销近况、市场需求与价格走势; 每季度还出版一期云母信息专刊。内容新颖、信息量大、简明实用, 是非金属矿行业的科研和经贸人员的必备工作资料。

《工业矿物信息》竭诚为各企事业单位和广大读者服务, 并热烈欢迎广大业内人士为本报投稿, 尤其需要短小精悍并具实用价值的文章, 稿件一经采用, 稿酬从优; 同时欢迎各单位来稿宣传自己的产品与技术, 本报愿为您牵线搭桥, 有需要者欢迎来

函或来电联系。

《工业矿物信息》为月报, 全年工本费 48 元; 年底出版合订本 (加印封面和目录), 具有信息储存价值, 每册工本费 50 元, 欢迎各单位和个人订阅。本部还有少量近几年的合订本, 需要者请到本部邮购。

邮局汇款: 武汉理工大学 (西) 非金属矿研究所 付桂珍
 邮编: 430070 电话: (027) 87882128, 87651816
 银行汇款: 武汉理工大学工行洪山支行
 帐号: 3202006709000475962
 请注明《工业矿物信息》订阅款