

颗粒浓度及粒度的光散射在线测量*

郑 刚 张志伟 蔡小舒 王乃宁

(上海理工大学仪表学院 上海 200093)

提要 介绍一种在线监测颗粒浓度及粒度变化的光散射方法。着重提出消除观察窗玻璃污染物对测量结果影响的办法。给出了部分现场实测结果。

关键词 颗粒粒度, 浓度, 光散射, 在线测量

1 引 言

近十几年来,人们提出了许多用于测量颗粒物质的粒度及浓度的光散射方法及仪器。但由于测量方法本身的限制,这些仪器基本上局限于实验室使用,不能满足工业界日益增长的在线实时监测要求。对颗粒物质的粒度及浓度实现在线监测,其优点明显。例如在粉体制备行业,通过对粉体出口处粒度的在线检测,可以实时地控制气流磨的加工时间,使产品加工过程最优化;在环保行业中,通过对除尘过滤器前后细小颗粒的浓度及粒度的在线监测,可以实时地了解除尘效率;又例如在石油化工行业中,经常使用烟气透平(turbine),通过对烟气管道中催化剂颗粒浓度及粒度的在线监测,可以实时调整加工工艺,避免催化剂大颗粒对烟气透平的侵蚀。这样的例子不胜枚举,正是由于在线监测的这些突出优点和工业上的迫切要求,促使世界各国在近几年中竞相发展这方面的技术和仪器^[1~3]。在线颗粒监测面临的最关键问题是怎样避免观察窗玻璃上的污染颗粒对测量结果的影响。作者在 1996 年报道了用于在线监测颗粒粒度变化的两次测量法^[4],本文则着重报道在线颗粒浓度测量的解决办法。

2 测量原理及方法

颗粒粒度的在线监测采用了激光前向小角散射方法,与此同时,颗粒浓度的在线监测则采用光透消光方法。测量系统的光学原理如图 1 所示。用一束平行激光照射被测颗粒群,由颗粒产生的前向散射光通过其后的接收透镜,被位于透镜后焦面上的多元圆环光电二极管接收,同时不被颗粒散射的透射光则由位于光轴上的光电元件接收。Fig. 1 Schematic diagram of the measuring system

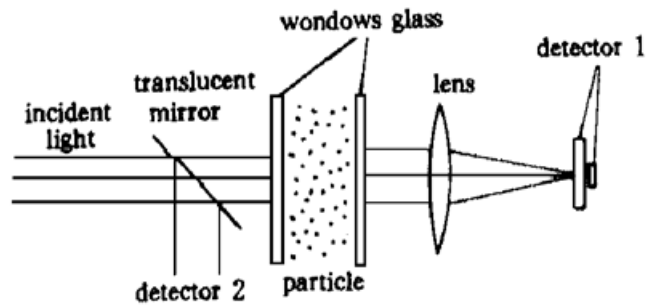


图 1 测量系统示意图

* 上海市自然科学基金资助项目, 编号 96ZF14004。

根据颗粒的散射光信号,可以求得颗粒的粒度尺寸,而根据透射光信号则可以求得颗粒的浓度大小。为清楚起见,下面先简单地介绍粒度的测量方法,并用衍射理论代替 Mie 散射理论(当然讨论结果对两者同样有效),然后再详细讨论浓度的测量方法。

设测量区中,直径为 D_i 的颗粒有 N_i 个,则根据 Fraunhofer 衍射理论,颗粒群在光电探测器各环上的散射光能分布为

$$E_n = (\pi/4)I_0 \sum_{i=1} N_i D_i^2 [J_0^2(X_{i,n}) + J_1^2(X_{i,n}) - J_0^2(X_{i,n+1}) - J_1^2(X_{i,n+1})] \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中 $X_{i,n} = \pi D_i S_n / (\lambda f)$, $X_{i,n+1} = \pi D_i S_{n+1} / (\lambda f)$ 。 S_n, S_{n+1} 为光电探测器第 n 环的内外半径, J_0, J_1 为零阶及 1 阶 Bessel 函数。若以颗粒的重量频率 W_i 表征尺寸分布,则式(1)变为

$$E_n = c \sum_{i=1} W_i / D_i [J_0^2(X_{i,n}) + J_1^2(X_{i,n}) - J_0^2(X_{i,n+1}) - J_1^2(X_{i,n+1})] \quad n = 1, 2, \dots$$

或写成矩阵形式

$$E = TW \quad (2)$$

方程(2)中, E 为可测量, T 为仅与系统尺寸参数有关的常系数矩阵。因此解此方程组即可求得尺寸分布列向量 W 。然而在在线监测中,被测对象往往是运动中的颗粒流,有时甚至是处在高温高压下的颗粒流,因此在测量区的前后通常加有耐温耐压的石英观察窗玻璃。很显然,窗玻璃内表面上的污染颗粒也同样参与光的散射,换句话说,光电探测器接收到的光散射信号中同时包含了被测颗粒的信息及污染颗粒的信息。我们在文献[4]中已经提出了消除污染物对实际颗粒粒度测量影响的 2 次相减方法,因此本文着重讨论对实际颗粒的浓度进行监测的方法。

参看图 2, 设被测颗粒的直径为 D , 单位体积中的颗粒数为 N , 则根据 Lamber-Beer 光透射定律, 入射光强与出射光强之间的关系为

$$I/I_0' = \exp(-\tau L) \quad (3)$$

式中 I 为出射光强, 它表示未被颗粒散射或吸收的直接透射光强(此时测量区中已有被测颗粒), I_0' 为入射光强, 此处实际是指测量区中没有被测颗粒时的出射光强。需要指出的是, 由于视窗玻璃对入射光的反射、折射及玻璃内表面污染颗粒的散射, 实际上真正的入射光强 I_0 与 I_0' 是不一致的(参看图 2)。式(3)中的 τ 为与光强无关的比例系数, 称为介质的衰减系数或浊度, L 为散射介质厚度。 τ 与颗粒直径及浓度有以下关系

$$\tau = NK\sigma = (\pi/4)D^2KN = (\pi/4)D^2NK(\lambda, m, D) \quad (4)$$

式中 σ 为单个颗粒的迎光面积, K 为消光系数, 它与入射光波长 λ 、被测颗粒直径 D 及颗粒相对于周围介质的复折射率 m 有关。按 Mie 理论, 其表达式为

$$K = (2/\alpha^2) \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) (|a_n| + |b_n|) \quad (5)$$

式中 $\alpha = (\pi/\lambda)D$, 为无因次尺寸, a_n, b_n 为 Mie 系数, K 的计算十分复杂, 需编制专门的计算程序^[6,7], 在此不再赘述。将式(4)代入式(3), 得

$$I/I_0' = \exp[-(\pi/4)D^2NK(\lambda, m, D)L] \quad (6)$$

解上式即可求得颗粒数浓度 N 。然而, 不幸的是在在线监测中, I_0' 的测量往往是困难的, 因为生产过程是连续的, 测量时管道中已有颗粒流存在, 所以能得到的是 I , 而不是 I_0' (如上所述,

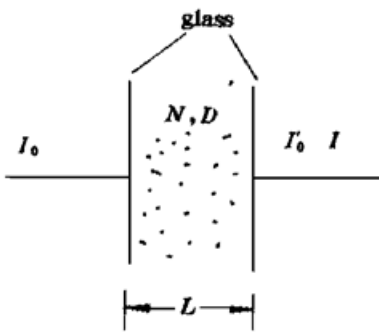


图 2 光的透射

Fig. 2 Transmission of light

I_0' 为没有颗粒时的出射光强)。为求得浓度, 让我们考虑 I_0' 与真正的入射光强 I_0 之间的关系。如图 2 所示, 设视窗玻璃总的透射率为 T_1 , 玻璃内表面污染物的透过率为 T_2 , 则 $I_0' = I_0 T_1 T_2$, 代入式(6) 得

$$I/I_0' = I/(I_0 T_1 T_2) = \exp[-(\pi/4) D^2 N K(\lambda, m, D) L] \quad (7)$$

如果入射光由 n 个波长混合组成, 则每个波长都有对应的式(7), 取其中的两式, 并使等号两边相除, 得

$$\frac{I/(I_0 T_1 T_2)_{\lambda_1}}{I/(I_0 T_1 T_2)_{\lambda_2}} = \exp\{- (\pi/4) D^2 N [K(\lambda_1, m, D) - K(\lambda_2, m, D)] L\} \quad (8)$$

消去 T_1, T_2 , 上式简化为

$$\frac{I/(I_0)_{\lambda_1}}{I/(I_0)_{\lambda_2}} = \exp\{- (\pi/4) D^2 N [K(\lambda_1, m, D) - K(\lambda_2, m, D)] L\} \quad (9)$$

从式(8)到式(9)已作了如下近似, 即假定玻璃的透射率及污染颗粒的透射率对两个有一定间隔的波长来说相等。于是由式(9)求得颗粒的浓度为

$$N = \frac{4[\ln(I/I_0)_{\lambda_1} - \ln(I/I_0)_{\lambda_2}]}{\pi D^2 [K(\lambda_2, m, D) - K(\lambda_1, m, D)] L} \quad (10)$$

式中 λ, m 及 L 为已知量, 当颗粒直径 D 测得后, K 也可由 Mie 理论算出, 而光强 I, I_0 则可由光电元件 D_1, D_2 测得(见图 1), 因此被测浓度 N 是个定值。需要指出的是, 式(10)中的 N 表示的单位体积中的颗粒数, 若已知颗粒的比重 ρ , 则可求得颗粒的重量浓度, 即

$$W_c = (\pi/6) \rho D^3 N \quad (11)$$

3 实测结果

根据改进的测量原理, 我们研制了一台颗粒粒度及浓度在线监测仪, 并将它用于烟气透平中催化剂颗粒浓度及粒度的在线监测(采样时间连续可调, 最短为几秒钟)。连续几个月的在线实测并同步地与离线采样比较, 结果令人满意。图 3 给出了某天某一段时间内的连续实测结果, 为使图样清晰可辨, 仅给出 136 个测量数据, 图中锯齿波表示粒度的测量值(左边的纵坐标表示), 梯形波表示浓度的测量值(右边的纵坐标表示, 实为 20 个测量数据的平均值), 图中的横坐标表示的是测量的时间。由图可见, 粒度的变化范围在 $1 \mu\text{m}$ 与 $4 \mu\text{m}$ 之间, 平均粒径为 $2 \mu\text{m}$ 左右, 浓度的平均值在 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下, 与离线方法吻合。在催化剂颗粒离线采样测试中, 用 Malvern 激光粒度仪测粒度, 用称重方法求重量浓度。

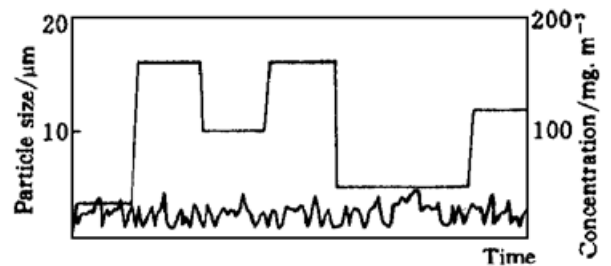


图 3 在线测量结果

Fig. 3 On-line measured results

最后需要强调的是, 在实际应用中, 视窗玻璃内表面仍应有适当的净化保护措施, 例如有连续的净化空气输入, 净化空气除保护玻璃不被污染外, 还能起到冷却隔离的作用, 否则玻璃上的污染会严重到无透射光输出或热辐射的干扰, 使仪器不能正常工作。

致谢 本文的现场测试、实验工作受到上海炼油厂设备处领导及设备研究所项善秋高工、徐伟、徐佳等工程师的大力支持, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 H. Umhauer, S. Berbner. Optical in-situ analysis of dispersed particles in gases at temperatures of up to 1000 °C. Edited by E. H. K. Leschonski, 6th European Symposium Particle Characterization. Nürnberg, Germany, Nürnberg Messe 1995, 327~ 336
- 2 B. A. Sachweh, H. Buettner, F. Ebert. In-situ characterization of airborne fibers by differential light scattering measurement. Edited by E. H. K. Leschonski, 6th European Symposium Particle Characterization. Nürnberg, Germany, Nürnberg Messe 1995, 349~ 360
- 3 D. J. Holve, T. L. Harvill. In-process particle size distribution measurements and control. Edited by E. H. K. Leschonski, 6th European Symposium Particle Characterization. Nürnberg, Germany, Nürnberg Messe 1995, 291~ 300
- 4 Zheng Gang, Cai Xiaoshu, Zhang Zhiwei *et al.*. A new two-step on-line measurement to determine particle size distributions. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(3) : 269~ 272 (in Chinese)
- 5 Zheng Gang, Cai Xiaoshu, Wang Naining. Numerical calculation of light energy in photodetector of laser particle sizer. *Chinese J. of Science Instrument* (仪器仪表学报), 1993, **14**(2) : 154~ 158 (in Chinese)
- 6 W. J. Wiscombe. Improving Mie scattering algorithms. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9) : 1505~ 1509
- 7 Zheng Gang, Cai Xiaoshu, Wang Naining. Numerical algorithms of Mie scattering. *Applied Lasers* (应用激光), 1992, **12**(5) : 25~ 27 (in Chinese)

On-line Particle Size Analysis and Concentration Measurement with Light Scattering

Zheng Gang Zhang Zhiwei Cai Xiaoshu Wang Naining

(Department of Instruments, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract A new on-line light scattering method to determine particle size and concentration is proposed in the paper. The problem of pollution in the observation windows can be well solved with this new method. The experimental results demonstrate that the light scattering method is valid for the on-line measurement of the particle size and concentration.

Key words on-line measurement, particle size, concentration, light scattering