

文章编号: 0258-7025(2001)11-1032-05

烟尘粉尘向大气排放的激光监测技术研究*

王乃宁 虞先煌 竺晓程

(上海理工大学动力工程学院 上海 200093)

摘要 提出了能直接测量烟尘和粉尘排放浓度和粒径大小的激光监测技术,具有实时快速、非接触、在线、无需取样和连续测量的优点。实验研究表明了该项技术的工作原理是正确的,测量结果是准确可靠的。

关键词 环境污染,激光测量,烟尘,粉尘,排放浓度,在线测量

中图分类号 T 247 **文献标识码** A

Study of the Laser Based Measuring Technique for Smoke and Dust in Emission

WANG Nai-ning YU Xian-huang ZHU Xiao-cheng

(College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract A laser based technique is proposed which is able to measure and supervise the mass concentration and particle size of smoke and dust in emissions. It is characterized by fast, non-contact, on-line and continuous measurements and gives a direct results of mass concentration in mg/m^3 . Experimental studies proved that the proposed method is correct in principle and accurate in the measurements.

Key words environmental pollution, smoke, dust, concentration of emission, on-line measurement

1 引言

随着我国国民经济的迅速发展,环境污染日趋严重。大量煤炭的直接燃烧决定了我国大气呈煤烟型污染,许多城市中的总颗粒悬浮物(Total Suspended Particles, TSP)长期居高不下,与世界卫生组织给出的空气质量标准相去甚远。北京、上海、广州、沈阳等地更被列为世界十大污染最严重城市之列。不久前,我国政府实施了“污染物排放总量控制”的重大战略方针,力争在2000年以前,分别把工业粉尘和烟尘的排放量控制在700万吨和1400万吨以内,还将逐步实行由“超标排放罚款”到“排污收费”的转变,这些政策的实施都要求能对每个污染源的排放量进行可靠、有效的测量。目前,虽然已经有了好几种烟尘和粉尘的测量方法,如林格曼黑度法、抽气取样称重法、浊度法等,但都难以满足现代环保检测的要求。本文提出的激光光散射法可以直接给出以 mg/m^3 计的烟尘或粉尘等的排放浓度和平均

粒径大小,具有实时快速、非接触、在线、无需取样、连续测量等突出优点。

2 基本原理和方法

图1给出了测量原理图^[1]。一束强度为 I_0 的入射激光穿过烟道,与烟道中的烟尘或粉尘颗粒相遇,产生了光散射。这时,穿过烟气的入射光强度减弱,此外,在非入射光方向也产生了散射光。理论研究指出^[2],在不相关的单散射条件下,上述散射光信号均与颗粒的大小和数量(即浓度)有关,这就为它们的确定提供了一个尺度和依据。

设烟道的宽(或直径)为 L ,烟尘或粉尘颗粒的

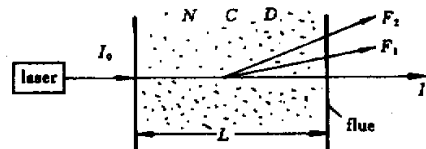


图1 光散射法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of light scattering method

* 国家自然科学基金(编号:59778017)资助项目。

收稿日期:2000-08-10

粒径为 D , 单位容积中的颗粒数为 N , 则其体积浓度和重量浓度相应为 $C_v = \pi D^3 N/6$ 和 $C_g = \pi D^3 N\rho/6$, ρ 为烟尘或粉尘颗粒的密度。穿过烟道时, 光束强度的减弱可以用消光值 I/I_0 表示, I_0 和 I 分别是入射光强度和透射光强度。根据光的透射定律, 消光值可写为^[3,4]

$$I = I_0 \exp \left[- \frac{\pi L}{4} \int_0^\infty D^2 K_s(D) f(D) dD \right] \quad (1)$$

或

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = \frac{\pi L}{4} \int_0^\infty D^2 K_s(\lambda, D, n) f(D) dD \quad (2)$$

式中 $f(D)$ 为粒径分布函数, $f(D)dD$ 表示粒径在 D 到 $D + dD$ 范围内的颗粒数, K_s 为消光系数, 它表征每个颗粒对入射光的衰减程度, 与入射光波长 λ , 颗粒粒径 D 和颗粒的材质(折射率 n) 有关, $K_s = f(\lambda, D, n)$, 可按经典米氏光散射理论计算求得^[5]。然而, 当颗粒粒径大于 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 后, 消光系数接近于 2, $K_s \approx 2$, 而与颗粒的材质(折射率) 无关。根据我国生产实践, 工业排放(烟尘或粉尘) 颗粒的平均粒径一般都远大于 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 。为此, 可以不考虑烟尘或粉尘颗粒材质(折射率) 的影响而足够精确地取消光系数 K_s 为 2, 使测量方法大大简化。

式(1)和(2)中的粒径分布函数 $f(D)$ 可以通过对散射光的测量得到^[6,7]。但在环保检测中, 首要的是测量烟尘或粉尘的浓度, 至于颗粒粒径的大小, 多数情况下知其平均粒径已可, 无需知道其详细粒径分布。这种情况下, 令平均粒径为 D , (2) 式即可简化为

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = \frac{3C_g L}{D\rho} \quad (3)$$

或

$$\ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = \frac{3C_v L}{D} \quad (4)$$

不难看出, (3) 和(4) 式中有二个未知数——平均粒径 D 和浓度(体积浓度 C_v 或重量浓度 C_g)。为要得到浓度, 先要求得平均粒径 D 。平均粒径 D 可以通过对二个立体角内散射光通量的测量得到, 现讨论如下。

任一空间立体角 θ_1/θ_2 内的散射光通量 F 可由下式计算

$$F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} I_s dS \quad (5)$$

式中 I_s 为单元面积 dS 上的散射光强, 当粒径大于 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 后, 可按夫朗和费衍射理论计算^[3]

$$I_s = \frac{\pi^2 D^4}{16\lambda^2 r^2} I_0 \left[\frac{2J_1(X)}{X} \right]^2 \quad (6)$$

式中 J_1 为一阶贝塞尔(Bessel)函数, 无因次参量 $X = \pi D \sin\theta/\lambda$, λ 为入射光的波长, θ 为散射角, I_0 为入射光强度, r 为颗粒到测量点之间的距离。将式(6)代入式(5)化简后, 可得不相关单散射条件下, 任意空间立体角 θ_1/θ_2 内 N 个粒径为 D 的颗粒群的散射光通量为

$$F = \frac{\pi I_0 N}{2} D^2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{J_1^2(X)}{\sin\theta} d\theta \quad (7)$$

若在二个不同的立体角 θ_1/θ_2 和 θ_1'/θ_2' 内测量颗粒群的散射光通量, 可相应地写出下列二个方程

$$F_1 = \frac{\pi I_0 N}{2} D^2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{J_1^2(X)}{\sin\theta} d\theta \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{\pi I_0 N}{2} D^2 \int_{\theta_1'}^{\theta_2'} \frac{J_1^2(X)}{\sin\theta} d\theta \quad (9)$$

二式相除后化简得

$$R = \frac{F_2}{F_1} = \frac{\int_{\theta_1'}^{\theta_2'} \frac{J_1^2(X)}{\sin\theta} d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{J_1^2(X)}{\sin\theta} d\theta} \quad (10)$$

(10) 式左边项为测量值 F_1 和 F_2 , 而右边积分项在立体角 θ_1/θ_2 和 θ_1'/θ_2' 的数值给定, 以及波长 λ 已知的条件下, 仅为颗粒平均粒径 D 的函数, 如图 2 所示, 图中 3 条曲线分别对应于不同的立体角。

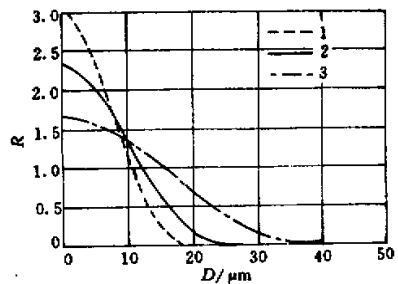


图 2 比值 $R = F_2/F_1$ 与粒径 D 曲线
Fig.2 Curve of ratio $R = F_2/F_1$ versus diameter D

综上所述, 根据 2 个立体角的散射光通量 F_1 和 F_2 可以确定颗粒的平均粒径 D , 代入式(3) 或(4) 后, 即可进一步根据消光测量值 I/I_0 求得烟尘或粉尘的体积浓度 C_v 或重量浓度 C_g 。

3 测量装置

在以上理论分析和结构参数优化的基础上, 研制开发了一台以激光为光源, 由计算机操纵和控制的测量装置, 外形尺寸较小, 能放入烟道中, 直接对

烟尘或粉尘的浓度和平均粒径进行实时、在线和连续的测量,如图3所示。探针体由不锈钢制成,呈细长杆状,长约650 mm,外径为50 mm。2个立体采角角的选取使该装置的最大测量粒径(平均粒径)为30 μm ,这已能满足大多数现场测量的要求。测量区的长度为210 mm。根据实际测量对象的不同,可以改变或调整测量区的长度以适应不同排放浓度的要求。

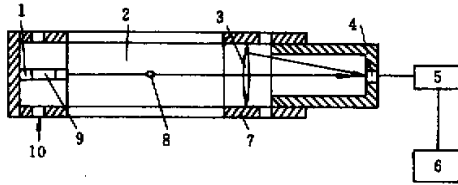


图3 测量装置原理图

1: 激光器; 2: 测量区; 3: 接收透镜; 4: 多元光电元件; 5: 接口系统;
6: 计算机; 7: 探针体; 8: 激光束; 9: 光学系统; 10: 冷却水

Fig. 3 Schematic diagram of measuring device

1: laser; 2: measuring area; 3: receiving lens; 4: multi-element opto-electric components; 5: interface; 6: computer; 7: probe;
8: laser beam; 9: optical system; 10: cooling water

一半导体激光器安装在探针体的前端,波长为0.6740 μm ,额定功率为2 mW。所有测量信号均由电缆线引出探针体外,使之在远离高温烟气的正常环境温度下,由电子元件和电子计算机接收和进行数据处理后,记录并贮存全部测量结果。为保证

伸入高温烟气中的探针体的正常工作,需采用有效的冷却措施和防止烟尘或粉尘颗粒对光学元器件表面的污染。

4 实验研究

4.1 静态试验

静态试验的目的是对本文所提出的测量原理和测量方法的正确性,以及测量结果的准确性进行验证和评价。采用的方法是对国家标准物质局认定和提供的、已知粒径的标准颗粒进行测量,并将测量结果与国家标准物质局的认定值进行对比,二者是否吻合一致。试验时,将盛有标准颗粒试样悬浮液的玻璃样品池置于图3所示测量装置的测量区中,受到激光照射后,采集消光值 I/I_0 以及两个立体角内的散射光能 F_1 和 F_2 ,按上述方法数据处理后求得试样的粒径。

目前,国家标准物质局只能提供二级商用性标准颗粒,其粒径认定值的偏差为 $\pm 8\%$,精度更高的一级标准颗粒尚不能生产^[8]。表1中给出了对4种名义直径(或称标签直径)分别为4.91 μm , 9.88 μm , 16.32 μm 和 20.62 μm 标准颗粒的各5次测量结果。由表可知,测量值与名义直径的偏差均不超过国家标准物质局给出的 $\pm 8\%$ 范围,且有很好的测量重复性。

表1 4种标准颗粒的测量结果(μm)

Table 1 Results of measurements for 4 SRM

Normal diameter	1	2	3	4	5	Mean diameter	Difference
4.91	4.84	6.02	4.79	6.10	4.86	5.32	7.7%
9.88	8.36	9.36	9.91	9.78	10.35	9.55	3.5%
16.32	15.49	15.54	15.54	15.40	15.57	15.51	5.2%
20.62	19.80	19.58	19.54	19.71	19.69	19.66	4.9%

表2 多分散性颗粒的测量结果(μm)

Table 2 Results of measurements for polydispersed particles

No.	1	2	3	4	5	Mean	FAM	Difference
Smoke	16.55	17.78	17.08	17.53	16.90	17.16	(16.36)	4.6%
Talkum	13.22	12.69	12.98	12.51	12.56	12.80	(11.49)	10.0%

Note: Figures in the parentheses are the results measured by another FAM laser granulometer.

国家标准物质局提供的标准颗粒为单分散性球形颗粒。所有标准颗粒均为球形,且有着几乎完全相同的粒径。实际上,工业性(烟尘和粉尘)颗粒绝大多数为多分散性,有一定的粒径分散范围,且为非

球形(多边形和多角形等)。本方法对多分散非球形颗粒是否仍能给出准确可靠的测量结果也是需要验证的。表2中给出了对上海杨树浦电厂采集的烟尘颗粒和市场上购买的滑石粉两种工业样品的各5次

测量结果, 并与另一台 FAM 激光测粒仪的测量结果(括号中数字)进行了对比。例如, 烟尘颗粒 5 次测量的平均值为 $17.16 \mu\text{m}$, 而用激光测粒仪测得的为 $16.36 \mu\text{m}$, 二者相差为 4.6%, 滑石粉的测量结果相应为 $12.80 \mu\text{m}$ 和 $11.49 \mu\text{m}$, 相差为 10%。表明了对多分散非球形颗粒的平均粒径也能给出满意的测量结果, 且同样有着很好的重复性。

以上静态试验验证了本文所述方法在理论和测量结果都是准确的。

4.2 动态试验

动态试验的目的是检验图 3 中所示的测量装置的可用性和可靠性, 是否能对流动状态下的烟尘或粉尘浓度和粒径进行测量, 以及测量结果的准确性如何。试验是在实验室内的气-固两相流试验台上进行的, 如图 4 所示。试验台主要由引风机、流量测量和加料装置组成。试验中所用的样品为上海杨树浦电厂烟道中采集到的烟尘, 它的平均粒径在试验之前已由激光测粒仪测定为 $16.36 \mu\text{m}$ 。

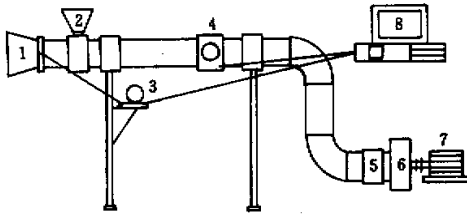


图 4 气-固两相流试验台架

1: 进风流量管; 2: 加料装置; 3: 压力变送器; 4: 测量装置;
5: 风机调节阀; 6: 引风机; 7: 电动机; 8: 计算机

Fig. 4 Testing set of gas-solid two-phase flows

1: air inlet; 2: sample add in; 3: pressure sensor; 4: measuring probe; 5: fan regulating valve; 6: fan; 7: motor; 8: computer

试验时, 先启动风机达到稳定后, 测量空气流量, 再把准备好的烟尘试样由加料口加入, 加入量经称重为已知。这样, 即在管道中得到一已知浓度和粒径的烟尘气流, 供测量检验之用。所研制的测量装置直接插入管道中, 对试样气流进行连续性的测量, 然后比较烟尘浓度和粒径的测量值是否与设定值一致。图 5 给出了风速为 26.4 m/s 时的连续序列测量结果, 根据该工况的空气流量和所加入的试样量可算得烟尘体积浓度的设定值为 $1.57\text{E}-05$, 而烟尘颗粒的平均粒径已由激光测粒仪测定为 $16.36 \mu\text{m}$ 。由图 5 可知, 无论是烟尘的体积浓度, 还是烟尘颗粒的平均粒径, 二曲线均有一定的起伏波动, 这与运行工况不够稳定以及加料不够均匀等

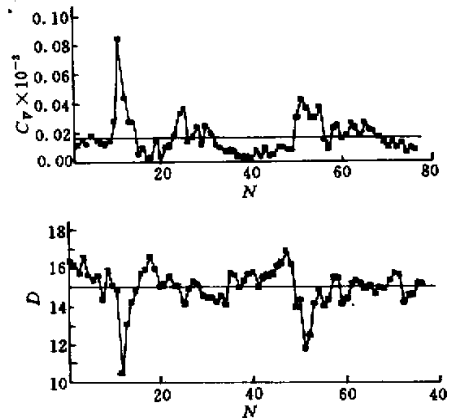


图 5 测量结果(风速为 26.4 m/s)

Fig. 5 Results of measurements (speed at 26.4 m/s)

因素有关, 对于实时连续测量属正常现象, 难以完全避免。但需要指出的是, 二曲线的平均值(图中水平线所示)分别为 $1.65\text{E}-05$ (烟尘体积浓度) 和 $15.01 \mu\text{m}$ (烟尘平均粒径), 与该次试验的设定值(体积浓度为 $1.57\text{E}-05$, 平均粒径为 $16.36 \mu\text{m}$) 十分接近, 二者相差仅 8.3% 和 4.8%, 这一结果无疑是令人十分满意的。

我们还进行了另二种工况下的连续性测量, 试样仍为上海杨树浦电厂烟道中采集的烟尘(平均粒径为 $16.36 \mu\text{m}$), 而风速加大为 33.2 m/s 和 36.2 m/s 。根据试验时的空气流量和试样加入量, 已知这二种工况下烟尘体积浓度的设定值为 $1.60\text{E}-05$ 和 $1.45\text{E}-05$, 而测量值相应为 $1.63\text{E}-05$ 和 $1.48\text{E}-05$, 如表 3 所示, 相差均不超过 5%, 测量结果是可靠的, 也是准确的。

表 3 不同工况下测量结果汇总表

Table 3 Summary of measurements under different conditions

No.	Speed m/s	Volume concentration, E-05		
		Preset value	Mea. value	Difference
1	26.4	1.57	1.65	4.8%
2	33.2	1.60	1.63	1.9%
3	36.2	1.45	1.48	2.1%

5 结论

由于光的透射性, 光电转换的快速性以及易于与计算机配合使用等特点, 使得本文提出的基于光

散射原理的激光烟尘粉尘监测技术具有实时快速、在线、连续测量等显著优点,且有很高的智能化程度。

理论分析表明,测量光束穿过烟道时的消光值以及二个角度下的散射光通量,即可直接得到以 mg/m^3 计的烟尘或粉尘排放浓度和平均粒径大小。

试验研究充分验证了本文所提方法理论上是正确的,测量结果是准确的,测量重复性也是良好的。所研制开发的测量装置具有很好的可用性,能对流动中烟尘或粉尘的浓度和平均粒径进行可靠的测量,测量精度能满足环保监测的要求,具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Zhu Xiaocheng. The measurement of mass concentration of particulate matters in stacks. Dissertation, University of Shanghai for Science and Technology, 2000 (in Chinese)
- 2 Kerker M.. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation. London: Academic, 1969
- 3 Wang Naining *et al.*. The Optical Measuring Techniques of Particle Size and Its Applications. Beijing: Press of Atomic Energy, 2000 (in Chinese)
- 4 Zheng Gang, Zhang Zhiwei, Cai Xiaoshu *et al.*. On-line particle size analysis and concentration measurement with light scattering. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, 25 (3):285~288 (in Chinese)
- 5 Van de Hulst. Light Scattering by Small Particles. London: John Wiley & Sons, 1957
- 6 Yu Shiming. A study of the continuous measurement of particulate emission. Dissertation, University of Shanghai for Science and Technology, 1999 (in Chinese)
- 7 Wang Naining, Yu Shiming. Real time and in-situ measurement of particulate emissions. Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21 Century. New York: Begell House, 2000, Vol. 3, 1250~1356
- 8 Wang Gengchen. The Calibration and Supervision of Particle Sizers. National Bureau of Standard Reference Material. 1992 (in Chinese)

第九届全国光电技术及系统学术会议在杭州举行

第九届全国光电技术及系统学术会议在金秋十月,丹桂飘香杭州市召开,浙江省和杭州市领导对这次会议非常重视,将其作为2001年西湖博览会的一个重要组成部分。

参加这次会议的有7位院士,9位“长江计划”特聘教授和150多名高校和科研机构的专家教授。大会名誉主席、两院资深院士王大珩先生为会议题词:“积极促进学术交流,努力发展光电产业”,并给会议发来了贺信,祝贺大会圆满成功。

10月16日上午开幕式前,浙江省委书记、副书记、杭州市市长及有关领导接见了参加会议的院士。开幕式上,省委副书记、纪委书记李金明致词,他说,这次光电界的学术盛会在杭州召开,将对推动浙江省的科技创新体系,提升本省产业层次,加速地方经济建设以及提前基本实现现代化都将起到强有力的推动作用。杭州市委副书记、市长仇保兴代表市委、市政府对大会的召开表示祝贺,他希望专家学者们能为杭州的高新技术产业发展献计献策,推动杭州“创文化名城,建经济城市”的建设进程。

在随后的1天半大会报告中,有13位院士及专家作了特邀专题报告,这些报告是:母国光院士的“基于白光信息处理的彩色摄影”,金国藩院士的“高密度光存储”,张以谟教授的“光电信息技术的某些发展前沿”,周立伟院士的“光学,迈向新世纪”,黄尚廉院士的“国内外光电产业发展现状、动向及对我国发展光电产业的若干思考”,刘硕豪院士的“光子学在祖国医学中的应用”,何赛灵教授的“硅基底平面波导光通信集成器件的模拟、设计及工艺”,庄松林院士的“光电子技术展望”,陈星旦院士的“长春光机所的短波光学研究”,王向

朝研究员的“激光干涉仪与纳米精度检测”,明海教授的“聚合物光纤及其应用”,敏通企业股份有限公司杨隆荣博士的“CCD技术的最新进展”以及窦晓敏教授的“近场光学中的分子动力学研究以及在生物医学中的应用”。光电技术中这些方方面面的研究和进展深深地吸引了与会代表,并从中得到了不少启发和教益。

在继后的分组报告中,有70篇论文在三个分会场作了深入的交流。

10月18日,由院士带队,部分专家和教授分两个组赴杭州市滨江区及富阳市考察。本文作者随黄尚廉、周立伟、庄松林院士及其他十几位专家赴富阳市学习考察,受到了富阳市政府和市委的热情接待。富阳市目前是浙江省最大的通讯器材生产基地,电缆、光缆产量均占全国总量的1/4以上。该市现有通讯器材工业企业近300家,从业人员13500多名,年生产总产值达50多亿元,占全市工业总产值20%以上,通讯器材业已成为富阳的第一大产业。上午考察组参观考察了富通集团、富春江集团和历史悠久的纸文化村,下午由富阳市政府和市委组织22家企业与考察组座谈,黄尚廉院士等介绍了目前光电产业的发展状况,并回答了企业界提出的一些问题,双方都感到受益匪浅。

第九届全国光电技术及系统学术会议由中国光学学会光电技术专业委员会主办,承办单位有中国计量学院、浙江大学、浙江省光学学会、浙江省计量测试学会、杭州市滨江区政府和富阳市政府。代表们对这次会议的精彩组织和顺利召开深表满意。

周德观