

光后向散射法测烟尘浓度的实验研究*

李霖峰 张 雷 董 磊 马维光 尹王保 贾锁堂

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

摘 要 设计了一套具有高灵敏度的利用光后向散射法测烟尘浓度的装置, 不仅具有实时、在线、连续测量等优点, 而且价格低廉、便于安装. 通过理论分析获得散射光强与烟尘浓度的关系, 并通过自行设计的测量装置测量了不同烟尘浓度下的散射光强, 验证了理论的正确性并获得了描述后向散射光强的电信号强度与烟尘质量浓度关系的曲线. 实验结果证明在烟尘浓度较低时, 后向散射光强与烟尘浓度有很好的线性关系.

关键词 应用光学; 烟尘浓度的测量; 环境污染; 后向散射

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

0 引言

散射是一种可观测的光与物质的相互作用. 通常所看见的物体的光, 都是被散射过来的光^[1]. 由于散射和人们的生活非常接近, 人们对于散射的研究也越来越多, 也越来越深入^[2~5]. 随着国民经济的发展, 环境污染日益严重, 为了对烟尘排放浓度进行比较准确的检测, 散射法越来越多的被应用到烟尘浓度的检测和粒径的测量中来^[6~8]. 目前, 前向散射法已被广泛的应用^[6,7], 后向散射法还鲜有报道. 本文提出了用光后向散射法测量烟尘浓度的技术, 理论分析计算了散射光强与烟尘浓度的关系, 并通过设计的这套具有易安装、高灵敏度、实时、在线、连续测量等优点的测量烟尘浓度的装置进行了实验测量, 证明了在烟尘浓度较低的情况下, 后向散射光强与烟尘浓度具有很好的线性关系.

1 实验原理

图 1 是后向散射测量烟尘浓度原理图. 一束强度为 I_0 的入射光通过烟道中的烟尘颗粒后光强减弱, 烟尘颗粒将其散射到各个方向, 对于与入射光方向夹角在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 范围内的这部分散射光被称为后向散射光. 假设散射粒子为球形的, 其直径为 D , 则其尺寸参量为 $k = \frac{\pi D}{\lambda}$, 研究证实, 颗粒散射光的特性主要取决于尺寸参量^[7]. 当颗粒尺寸与入射光波长可以比拟时, 散射光的强度由 Mie 散射理论^[9]来描述. 目前, 工业排放粉尘的粒径一般都在几百 nm 到几 μm 的范围内, 基本上与常用的探测光波长处于同一数量级, 所以可以用 Mie 散射理论来计算

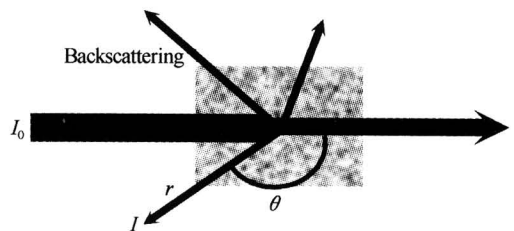


图 1 后向散射测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of light backscattering
烟尘后向散射光强以达到对实际工业排放烟尘浓度测量的目的. 根据 Mie 散射理论, 当波长为 λ , 强度为 I_0 的平行光束入射到颗粒粒径为 D 的球形粒子上时, 则在空间与散射粒子距离为 r 处的散射光强 I_1 为^[9,10]

$$I_1 = \frac{I_0}{r^2} \sigma = \frac{I_0 \lambda^2}{8\pi^2 r^2} [i_1(k, m, \theta) + i_2(k, m, \theta)] \quad (1)$$

式(1)中 σ 为单颗粒的散射系数. 鉴于目前工业粉尘在排放前, 都经过了净化除尘, 不仅使得排放出的尘粒粒径比较均匀, 也使得排放出的粒子浓度比较低. 这样, 对于一个散射体来说, 虽然散射体中的每一个粒子都是暴露在其他粒子的散射光之下的, 它散射被散射过来的光的一部分, 某些被一次散射的光在从散射体中射出去之前, 可能经过多次散射, 但在低烟尘浓度下进行测量情况下, 这对于从一次散射光中消除的光总量影响不大, 因此, 多次散射是可以忽略的. 而由于散射体中粒子随机的空间分布, 就使得散射是互相独立和不相干的, 因而在某一方向上的散射强度, 就是散射体中各个粒子在这一方向上散射强度的相加^[1]. 这时若单位体积内的颗粒数为 N , 则单位散射体的散射系数为 $N\sigma$. 这里用颗粒的平均粒径来表示散射体中颗粒的粒径分布. 那么当光入射到一个单位散射体上时, 则在距离为 r 处的散射光强 I_2 为

$$I_2 = \frac{I_0}{r^2} N\sigma = N \frac{I_0 \lambda^2}{8\pi^2 r^2} [i_1(k, m, \theta) + i_2(k, m, \theta)] \quad (2)$$

* 山西省自然科学基金(20041037)资助项目
Tel: 0351-7018927 Email: llf@sxu.edu
收稿日期: 2005-04-07

在式(1)、(2)中, k 为尺寸参量, m 为被测颗粒折射率, θ 为散射角 ($90^\circ < \theta < 270^\circ$), $i_1(k, m, \theta)$ 和 $i_2(k, m, \theta)$ 为散射强度函数, 分别表示平行于与垂直于散射面的强度分量, 可用散射振幅函数 $S_1(k, m, \theta)$, $S_2(k, m, \theta)$ 来分别表示

$$i_1(k, m, \theta) = |S_1(k, m, \theta)|^2, i_2(k, m, \theta) = |S_2(k, m, \theta)|^2 \quad (3)$$

$$S_1(k, m, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)\} \quad (4)$$

$$S_2(k, m, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)\} \quad (5)$$

a_n, b_n 是与 k, m 有关的量, 其值可由 Ricattic-Bessel 函数决定, π_n, τ_n 仅和散射角 θ 有关, 可由勒让德 (Legendre) 函数给出. 目前我国工业烟尘在排放前都经过了净化除尘, 排放出的尘粒粒径比较均匀. 这样由式(2)可以看出, 在入射波长 λ 、入射光强 I_0 、探测距离 r 、被测粒径的尺寸参量 k 、折射率 m 以及后向散射角 θ 已知时, 散射光强就与粒子数浓度成正比, 这就是用光后向散射法测烟尘浓度的依据.

2 实验装置

图2为光后向散射法测烟尘浓度的实验装置图. 光源为三个波长为 600 nm 左右的高亮度发光二极管, 经过会聚准直扩束系统后输出三束平行光, 由幅度可调范围为 2.5~4.5 V 的恒压源对其进行供电. 由矢量锁相放大器 (Stanford Research Systems Model SR830) 输出的正弦信号加在恒压源上对发光二极管进行强度调制. 三束直径为 3 cm 的光束在烟道内会聚形成一个长轴约为 18 cm, 短轴约为 3 cm 的椭球状光散射区域, 此椭球区域中心距离与其共轴的接收透镜 ($d=3$ cm, $f=8.5$ cm) 40 cm. 这部分椭球状区域即为取样区域, 图 3 为其光路图. 这样, 只有取样区域中的烟尘所散射的垂直于接收透镜的光, 才能会聚到位于透镜焦点处的光电探测器上, 而其它不垂直于透镜入射的散射光即使被透镜会聚, 也不会被探测器探测到. 这就基本上消除了其它杂散光对测量造成的影响. 光电探测器将探测到的光转变为电信号, 输入锁相放大器进行相关解调. 计算机和锁相放大器相连, 对结果进行记录保存并实时显示. 本实验中采用的模拟烟道如图 4 是一个高为 70 cm, 直径为 127.5 cm 的圆柱和一个高为 31.5 cm, 底部直径为 127.5 cm 的圆锥焊接而成, 圆柱上面配有封盖, 封盖下部中心装有直径为 50 cm, 转速为 1500 转/分的风扇, 当其转动时, 烟道

中的烟尘可以均匀分布于烟道中, 圆柱面上距封盖 35 cm 处焊有一法兰, 后向散射装置就架在这个法兰上.

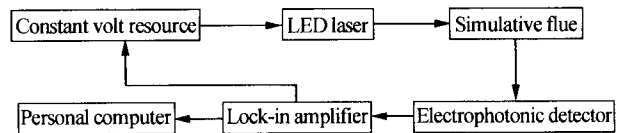


图2 光后向散射法测烟尘浓度实验装置

Fig. 2 The device of detecting concentration of soot based on optical backscatter

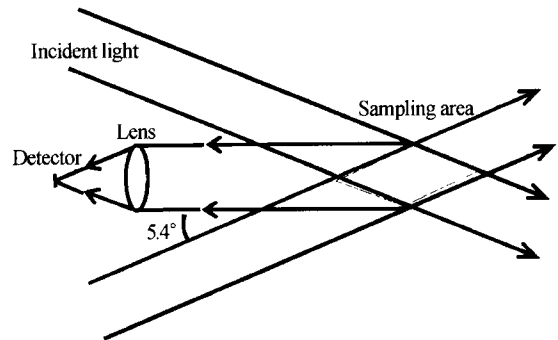


图3 后向散射法测烟尘浓度光路图

Fig. 3 Optical diagram of detecting concentration of soot based on optical backscatter

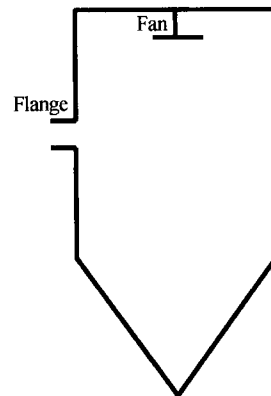


图4 模拟烟道

Fig. 4 Sketch map of simulative

3 实验结果及讨论

实验中发现调制相位以及调制频率都对此装置的灵敏度有影响, 为了获得一个最佳的探测灵敏度, 就需要选择最佳调制相位和调制频率, 调制频率的选择由发光二极管的最佳响应频率来决定. 通过用 Labview 来控制锁相放大器和示波器, 从示波器上采集获得信号强度随调制相位变化的关系如图 5(a) 以及随调制频率变化的关系如图 5(b), 得到在相位位于 -20° , 调制频率位于 104 Hz 时, 此装置具有最高的灵敏度. 同时取样区域是由三束光会聚形成, 光强较强, 这就进一步提高了测量的灵敏度. 图6为装置安装到模拟烟道之前其灵敏度的测试图. 将相位调于 -20° , 调制频率调于 104 Hz, 放出一股

烟雾(普通香烟所发出的烟雾),使其通过取样区域,由于烟雾对光的后向散射,原本比较平稳的信号就产生了一个比较尖的脉冲,随着烟雾渐渐散去,信号又渐渐趋于平稳.这就验证了其高的灵敏度特性.实验中采用平均粒径约为 $5\ \mu\text{m}$ 左右的煤粉颗粒.由于烟道的容积一定,故可用某一时刻烟尘的累计质量来代表此时的烟尘浓度.实验结果如图 7,结果显示后向散射信号强度与烟尘质量浓度具有很好的线性关系.利用一元线性回归^[11]求得电信号强度 V 关于烟尘质量浓度 M 的线性回归方程 $V = 0.05 + 7.19 \times 10^{-4} M$.可以看出,强度与浓度的比值系数为 7.19×10^{-4} .实验中入射光强约为 $1.12 \times 10^4\ \text{W}/\text{m}^2$,尺寸参量 k 为 52.3,散射角 θ 为 3.047 ,折射率 m 为 1.518,由式(2)计算所得的比值系数为 6.56×10^{-4} ,

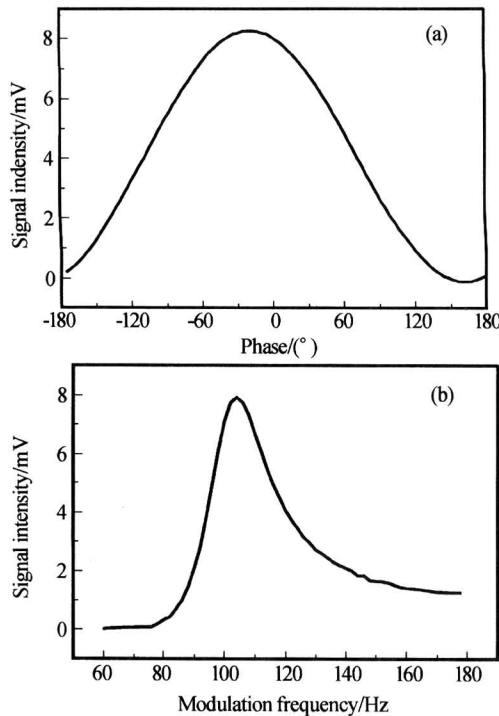


图 5 (a)信号强度与相位的关系;(b)信号强度与调制频的关系

Fig. 5 (a)Relation between signal intensity and phase; (b)Relation between signal intensity and modulation frequency

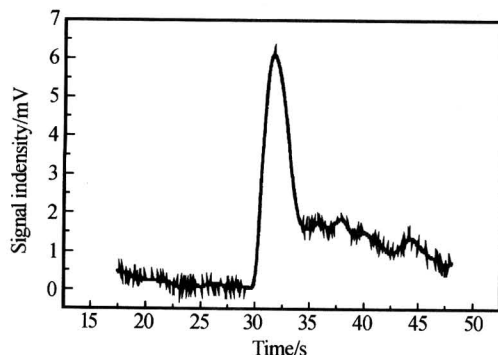


图 6 装置对烟雾的响应

Fig. 6 Response of device to smog

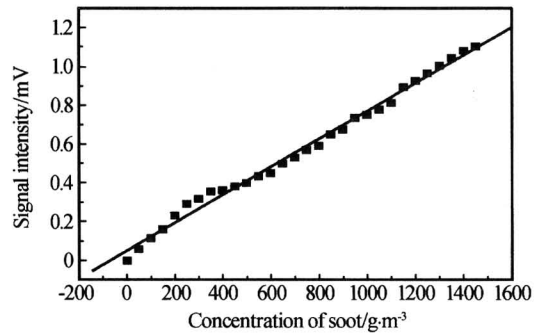


图 7 烟尘浓度与散射信号强度关系

Fig. 7 Relation between concentration and signal intensity with experimental results. The error of the linear regression equation and theoretical analysis of the concentration of soot and signal intensity is 8.83%. The linear relationship between concentration and signal intensity also has a certain error, which may be caused by two aspects: one is that the simulated smoke duct volume is large, and soot will adhere to the duct wall during the measurement process; the other is that the measured dust particles are not strictly uniform. For this linear regression, a significance test is performed, taking the significance level $\alpha = 0.05$, using the t -test method to test, and the regression effect is significant.

4 结论

设计了一套灵敏度较高的后向散射装置,不仅能实时快速,在线,无需取样,连续地测量,而且价格低廉,便于安装.理论分析表明,当光束穿过烟尘时,由烟尘所引起的后向散射光强与烟尘浓度成正比关系,并从实验研究证明此理论分析是正确的.所设计的测量装置具有很好的可用性.这将对以后烟尘浓度以及污染气体检测装备的安装简便化、价格低廉化和高灵敏化提供可靠的参考价值.

参考文献

- Mccartney E J. 大气光学. 北京:北京科学出版社,1988. 1~3,228~263
Mccartney E J. Optics of the Atmosphere. Beijing: Beijing Science Press, 1988. 1~3, 228~263
- Roy GG, Jonathan Lucas, Gareth E T, et al. Calculation of Mie derivatives. *Appl Opt*, 2004, **43**(28): 5386~5393
- 张建生, 陈良益. 钼钼钼的表面增强喇曼散射效应研究. *光子学报*, 2005, **34**(2): 288~292
Zhang J S, Chen L Y. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 288~292
- 宋牟平, 范胜利, 陈好, 等. 基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 的研究. *光子学报*, 2005, **34**(2): 233~236
Song M P, Fan S L, Chen H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 233~236
- 车明, 刘江涛. 六角形散射光子晶体的界面态. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1393~1396
Che M, Liu J T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1393~1396
- 王乃宁, 虞先煌, 竺晓程. 烟尘粉尘向大气排放的激光监

- 测技术研究. 中国激光, 2001, **28**(11): 1032~1036
Wang N N, Yu X H, Zhu X C. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(11): 1032~1036
- 7 王玉茹, 冯德振, 张智杰. 光散射法测烟尘浓度的实验研究. 济南大学学报, 2001, **15**(3): 253~255
Wang Y R, Feng D Z, Zhang Z J. *Journal of Jinan University*, 2001, **15**(3): 253~255
- 8 徐贯东, 王乃宁. 多波长散射光通量法测颗粒尺寸分布的实验研究. 应用激光, 1997, **17**(2): 61~64
Xu G D, Wang N N. *Applied Laser*, 1997, **17**(2): 61~64
- 9 Hulst V D. Light scattering by small particle. London: Chapman and Hall, 1957
- 10 Kerker M. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation. London: Academic, 1969
- 11 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第二版). 北京: 高等教育出版社, 1989. 264~272
Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y. Probability and Symbolic Statistic(Secondong Edition). Beijing: Higher Education Press, 1989. 264~272

Experimental Study of the Concentration of Soot Based on the Method of Optical Back-Scattering

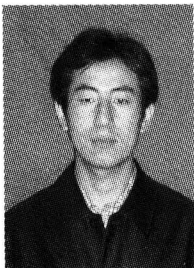
Li Linfeng, Zhang Lei, Dong Lei, Ma Weiguang, Yin Wangbao, Jia Suotang

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi Univ., Taiyuan 030006

Received date: 2005-04-07

Abstract Designing a device with high sensitivity, which is used to measure the concentration of soot based on optical backscattering. It is not only characterized by real time, on-line and continuous measurements but also because its price is cheap and it is easy to install. It achieved the relation between optical intensity and concentration of soot by theoretic analysis and measured optical intensity in different concentration by using the device which was designed by the researchars of this paper. It testified theoretic validity and achieved the curve which describe the relation between concentration and signal intensity. The experimental result shows that there is a good linear relation between back-scattering lighe intensity and concentration under the condition of lower concentration.

Keywords Applied optics; Measurement of soot concentration; Environmental pollution; Back-scatterin



Li Linfeng was born in July of 1980. He received his B. S. degree in Electronics from the Shanxi University in 2002. Now he is studying in Shanxi University for the Master's degree. He is studying on the applied laser spectrum.