

文章编号: 0258-7025(2004)06-0749-03

一种改进的消光式颗粒计数传感器

黄廷磊^{1,2}, 李 敏¹, 郑 刚³, 王乃宁³, 陈亚珠²

¹ 桂林电子工业学院计算机系, 广西 桂林 541004

(² 上海交通大学生物医学仪器研究所, 上海 200030; ³ 上海理工大学光电学院, 上海 200093)

摘要 分析了消光式液体颗粒计数传感器的典型结构,并根据 Mie 理论计算了折射率为 1.33 的消光系数曲线,说明颗粒粒径在小于 $2\ \mu\text{m}$ 时与消光系数呈多值性对应关系,指出这种多值性关系是影响此类计数器不能用于检测小颗粒的主要原因。最后提出一种改进的液体颗粒计数传感器结构,对传感器中光学部分的采光透镜组进行了改造,增加散射光探测器和光源监控探测器。通过计算说明了将散射光探测器安置在 45° 采光角时的原因,此时的光能与颗粒粒径之间有较好的单值对应关系,还可减少折射率对测量结果的影响。实验对比表明,改进结构的传感器对小于 $2\ \mu\text{m}$ 的标准颗粒试样有较好的检测能力,而且多次重复测量结果相近;对大于 $2\ \mu\text{m}$ 颗粒的检测能力仍然保持着较高的水平。

关键词 激光技术;消光;光学颗粒计数器;光散射

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

An Improved Sensor of Extinction Particle Counter

HUANG Ting-lei^{1,2}, LI Min¹, ZHENG Gang³, WANG Nai-ning³, CHEN Ya-zhu²

¹ Department of Computer, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

² College of Life Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China

³ College of Opto-Electronics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Particle counter of extinction type is used mainly to detect the particulate contamination of larger sizes, and widely applied in contamination control measurement and monitor, whereas it is unable to detect smaller sizes particulate, the reason is discussed in this paper. Based on Mie theory, extinction coefficient is calculated, at the same time, the representative structure of this type sensor is analyzed. Numerous calculation and analysis showed that it is due to the ambiguity relationship of extinction coefficient versus particulate sizes less than $2\ \mu\text{m}$ and unreasonable design. An improved design of the sensor was proposed, which employs a specially designed detecting lens unit to collect more scattered light and a monitoring device to control the light source, the lens of collecting scattering light is arranged at 45° degree, which can lead the good monodromy for light energy versus particulate sizes and less interference due to particle refractive index. Comparative experiments showed that the lower limit of the measuring size range could be extended by the new sensor design. The new sensor has a good detect ability for particle sizes less than $2\ \mu\text{m}$ and lower repetition errors, and furthermore, it still has a high level for detecting larger sizes particle, it suits for more application of contamination degree monitoring.

Key words laser technique; extinction light; extinction particle counter (EPC); light scattering

1 引 言

光学颗粒计数器(OPC)已经在很多行业得到了

较多的应用,其中基于光阻原理的消光式液体颗粒计数器(EPC)在全球的洁净(或污染)控制行业中应

收稿日期:2003-03-31;收到修改稿日期:2003-05-06

基金项目:广西自然科学基金(0229052)资助项目。

作者简介:黄廷磊(1971—),男,安徽肥东人,桂林电子工业学院计算机系副教授,上海交通大学生命科学技术学院博士后,主要从事激光应用技术、智能传感器和信息融合技术研究。E-mail:tlhuang@263.net

用最为广泛。虽然消光式液体颗粒计数器的应用越来越广泛,但此种计数器中传感器结构的先天不足,限制了它的应用范围。由于被测颗粒粒径小于 $2\ \mu\text{m}$ 时的消光系数与粒径之间呈多值性对应关系,决定了消光式光学颗粒计数传感器的可检测粒径下限不超过 $2\ \mu\text{m}$,难以满足日益发展的行业需求。实际应用中面临的主要问题是如何延伸此种计数器最小可检测下限,分辨出微米级以下的颗粒。本文对典型消光式液体颗粒计数传感器的结构进行了分析,并给出了改进后的传感器结构和对比实验结果。

2 传感器的典型结构

典型的消光式液体颗粒计数传感器结构如图 1 所示。此时,透射光能为

$$\Delta E = E_0 \left(1 - \frac{a}{A} K_{\text{ext}} \right) \quad (1)$$

其中, a 和 A 分别为颗粒的投影面积和入射光束的截面积, K_{ext} 为消光系数, E_0 为原始入射光的光能量,对应无颗粒时光电探测器所接收到的光能, ΔE 为透射光能,对应有颗粒遮挡时光电探测器所接收到的光能。

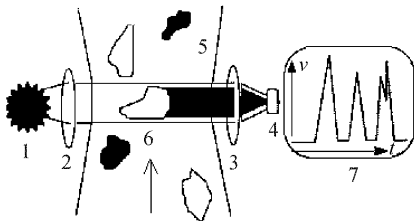


图 1 消光式液体颗粒计数传感器的结构

- 1: 激光源; 2,3: 透镜; 4: 探测器;
 - 5: 通道; 6: 颗粒; 7: 探测器输出信号
- Fig. 1 Sensor structure of EPC
- 1: laser light source; 2,3: lens; 4: PD;
 - 5: passage; 6: particle; 7: PD output

图 2 为根据 Mie 理论计算出的消光曲线,当 α 较小(无因次参数 $\alpha = \pi D/\lambda$, D 为颗粒粒径)时,消光系数具有明显的起伏振荡,随着 α 的增大,消光系数 K_{ext} 接近于定值 2 而与粒径、折射率无关^[1,2],因此消光式液体颗粒计数器一般只能用于对较大颗粒的测量。

3 改进结构

传感器的改进结构如图 3 所示,增加透镜组模块,模块内有小孔光阑、光阱和光束变换组件。此

外,在传感器中还设置了三路光电探测器,探测器 1 用于消光测量,适用于对 $4\ \mu\text{m}$ 以上颗粒的测量;探测器 2 用于接收前向 $45^\circ \pm 15^\circ$ 范围内的散射光,适用于对小颗粒的测量;探测器 3 用于监控光源的稳定性,获得测量时光源相对标定时光源的波动系数,然后用此系数对测量结果进行修正,以减少因光源波动而引起的重复测量误差。

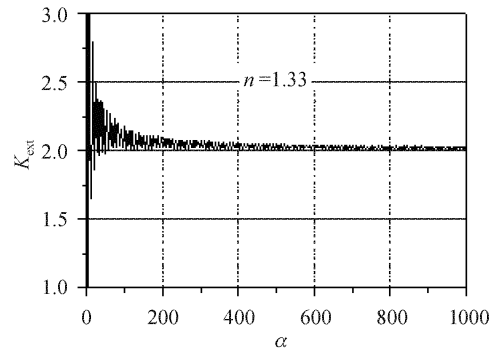


图 2 折射率为 1.33 的消光曲线

Fig. 2 Extinction curves with refractive index 1.33

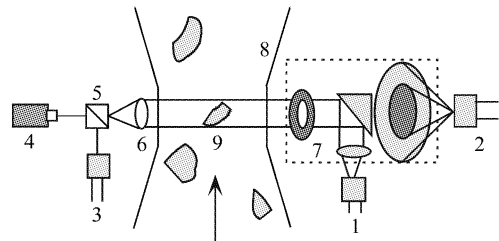


图 3 改进后的传感器结构

- 1,2,3: 探测器; 4: 激光源; 5: 分光器;
 - 6: 透镜; 7: 透镜组; 8: 通道; 9: 颗粒
- Fig. 3 Improved structure of sensor
- 1,2,3: PD; 4: laser light source; 5: spectroscopically;
 - 6: lens; 7: lens pair; 8: passage; 9: particle

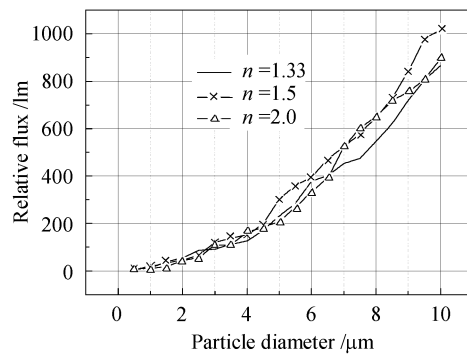


图 4 45° 采光角下的光通量-粒径理论曲线

Fig. 4 Theoretical curve of $F-D$ at 45° degree

经过大量的数值计算表明,在 45° 采光角下光通量和粒径 ($F-D$) 之间有较好的单值对应关系且

在小颗粒范围内受折射率影响最小,图 4 给出了具有代表性的数值计算结果。图中入射光波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, 采光立体角为 30° 。数值计算结果说明,在小粒径范围内,通过测量 45° 下一定空间立体角的散射光,可以忽略不同折射率对测量精度造成的影响,故探测器 2 的采光角选择在 $45^\circ \pm 15^\circ$ 。传感器对大小颗粒的测量由软件根据信号强度自动识别,分界点在 $4 \mu\text{m}$ 左右。

改进后的传感器结构中,探测器 2 接收的光能和粒径之间的关系为^[1]

$$F = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \sin\theta d\theta \quad (2)$$

式中, λ 为入射光波长, I_0 为入射光强, θ_1, θ_2 为立体采光角, $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 为散射强度函数(含有被测颗粒的粒径信息),定义为

$$i_1(\theta) = \left| \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} (a_l \pi_l + b_l \tau_l) \right|^2$$

$$i_2(\theta) = \left| \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} (a_l \tau_l + b_l \pi_l) \right|^2 \quad (3)$$

其中, a_l, b_l 为 Mie 系数,是折射率 n 和无因次参数 α 的函数,可以用半整数阶 Bessel 函数和第二类 Hankel 函数表示; π_l 和 τ_l 与散射角 θ 有关,可以用

$\cos\theta$ 的 Legendre 和一阶缔合 Legendre 函数表示,详细的定义及计算方法见文献[3~6]。

4 实验结果

为了检验改进后的传感器对小颗粒的分辨能力和重复计数能力,对直径为 $0.5 \mu\text{m}, 0.7 \mu\text{m}, 0.9 \mu\text{m}, 1.6 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}, 4.0 \mu\text{m}, 6.0 \mu\text{m}$ 的 Duke Scientific 公司生产的标准计数颗粒样品,进行对比测试,测试结果如表 1 所示。从测试结果可看出,典型的消光式传感器对 $2 \mu\text{m}, 4 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$ 颗粒的计数效率分别为 $79.6\%, 83.6\%$ 和 84% ,对 $2 \mu\text{m}$ 以上颗粒的计数效率还是可以的,但无法对小于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒进行检测。而改进后的传感器能很好地检测 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内的颗粒,5 次测量结果的重复性也是比较好的。在测量 $0.5 \mu\text{m}$ 颗粒时的计数效率为 69% ,在测量 $2 \mu\text{m}$ 以上颗粒时的计数效率可达到 85.2% ,说明在典型的消光式传感器结构中,增加散射光和光源波动探测器,能有效地扩展最小可检测粒径下限,对大于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒的计数效率也有所提高,已基本能满足洁净控制中对颗粒状杂质的检测要求。

表 1 对标准颗粒的检测结果

Table 1 Results of measurements for standard spheres

Label D / μm	Label N counts /ml	Primary method counts /ml	Presented method					Counts /%
			No. 1 counts /ml	No. 2 counts /ml	No. 3 counts /ml	No. 4 counts /ml	No. 5 counts /ml	
0.5	1×10^9	—	0.64×10^9	0.71×10^9	0.70×10^9	0.67×10^9	0.73×10^9	69.0
0.7	1×10^9	—	0.72×10^9	0.74×10^9	0.73×10^9	0.76×10^9	0.77×10^9	74.4
0.9	1×10^9	—	0.79×10^9	0.75×10^9	0.77×10^9	0.76×10^9	0.78×10^9	77.0
1.6	1×10^9	—	0.84×10^9	0.82×10^9	0.83×10^9	0.85×10^9	0.84×10^9	83.6
2.0	5×10^8	3.98×10^8	4.24×10^8	4.26×10^8	4.34×10^8	4.20×10^8	4.27×10^8	85.2
4.0	5×10^7	4.18×10^7	4.21×10^7	4.22×10^7	4.28×10^7	4.26×10^7	4.32×10^7	85.2
6.0	1×10^7	0.84×10^7	0.86×10^7	0.84×10^7	0.85×10^7	0.85×10^7	0.86×10^7	85.2

5 结 论

消光式液体颗粒计数传感器的应用很广,但其典型的结构决定了其最小可检测下限为 $2 \mu\text{m}$ 。理论和实验分析表明,在传感器结构中增加散射光探测是延伸其检测下限的一种切实可行的方法。改进后的传感器继承了典型传感器对大颗粒的计数能力,提高了对小颗粒的分辨能力,扩大了行业应用范围,有较好的应用前景。

参 考 文 献

1 Huang Ting-lei. Study of optical measuring technique for the particulate contaminant in clean media [D]. *University of*

Shanghai for Sci. & Tech., 2000. 1~10, 56~57

黄廷磊. 洁净介质中颗粒状杂质的光学检测技术研究[D]. 上海理工大学, 2000. 1~10, 56~57

- Zheng Gang, Zhang Zhi-wei, Cai Xiao-shu *et al.*. On-line particle size analysis and concentration measurement with light scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3):285~288
- 郑刚, 张志伟, 蔡小舒等. 颗粒浓度及粒度的光散射在线测量[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(3):285~288
- J. Z. Knapp, T. A. Barber, A. Liberman. *Liquid- and Surface-Borne Particle Measurement Handbook* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 1996. 1~29
- L. P. Bayvel, A. R. Jones. *Electromagnetic Scattering and Its Applications* [M]. New Jersey: Applied Science Publishers, Inc., 1981. 22~44
- H. C. Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles* [M]. London: Chapman and Hall, 1957. 127~135
- C. F. Bohren, D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983. 57~101