

• 研究报告 •

气溶胶中的微小粒子计数技术

黄廷磊, 郑 刚, 王乃宁

(上海理工大学, 上海 200093)

摘 要: 分析了单个微粒的光能和粒径之间的关系。鉴于单个颗粒的散射光信号很弱, 提出在激光器的内腔测量小粒径颗粒。实践证明, 该方法对较小粒径的颗粒检测有效。

关键词: 气溶胶; 颗粒检测; 散射; 光能

中图分类号: X 851 文献标识码: B 文章编号: 1006-2009(2000)02-0017-03

Counting Techniques of Micro-particles in Aerosol

HUANG Ting-lei, ZHENG Gang, WANG Nai-ning

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Relationship between the energy of single micro-particle and its diameter was analysed in the article. Because the scattering signal of a single particle is very weak, the diameter of the particle can be detected inside laser producer. The practice showed the method is effective for detecting the diameter of micro-particles.

Key words: Aerosol; Detecting particles; Scattering; Photo energy

在环境受到污染的领域, 人们呼吸时吸入的不是纯净的空气而是气溶胶。气溶胶对人体健康有重要影响, 危害强度主要依赖于其成分、浓度、来源和粒径。粒子成分是主要的致病因子, 决定是否有危害和致何种疾病。一般而言, 粒径 $> 30 \mu\text{m}$ 的颗粒, 进入下呼吸道的可能性很小, $10 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ 的颗粒绝大部分沉积在鼻腔, $5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 的颗粒可进入气管和支气管, 只有 $< 5 \mu\text{m}$ 的颗粒才能进入到深部呼吸道和散布于肺泡上。显而易见, 只有 $< 10 \mu\text{m}$ 的粒子气溶胶才是最危险的^[1]。

如何有效的检测空气中的颗粒状污染物, 采取必要的保护性措施, 一直是国内环境研究的一个重要课题。现提出一种利用激光器的开放腔作为颗粒注入区的方法, 结合先进的光散射法对空气中的超细颗粒进行计数和粒径分档。实验表明该方法比较适合小粒径颗粒的检测。

1 测量原理

光线通过不均匀的介质而偏离它原来的传播方向, 将发生光的散射现象。散射光的光强分布及偏振规律与散射颗粒的大小及密度有关。按照经典理论, 散射颗粒在入射光的电磁场作用下极化形

成电偶极子, 当散射颗粒的极化率 X_e 为常数时, 偶极距的值为 $P = x_e E_0 \cos 2\pi v_0 t$, 它是以入射光频率 v_0 作周期性变化, 于是偶极子的振荡而辐射出来的光——散射光的频率就是偶极子的振荡频率, 也即与入射光的频率相同。Mie 给出了对各向均匀同性的介质球在平行光束(平面电磁波)照射下电磁波方程的严格数学解。

侧向光散射式颗粒计数原理如图 1 所示。部件 1、2 级成气体激光器, 其相对距离为 25 cm, 激光器的输出功率为 0.8 mW。由于激光器的共振腔成开放式, 空气中的灰尘, 极易污染布儒斯特窗和前端全反镜, 为减小由于污染而引起的信号衰减, 在使用前应清洗布儒斯特窗和全反镜。当激光束 8 投射到球型颗粒 3 时, 其在 90° 方向的散射光被采光透镜组 5 接收后, 经过针孔 6, 由光电倍增管 7 转化成电信号, 再经过相应的处理后送到计算机进行分析。分光器 4 的作用是获取部分参考光, 对激光器的输出光强进行监控, 以便修正因光源波

收稿日期: 1999-08-23; 修订日期: 1999-11-25

基金项目: 上海市“曙光计划”资助(No. 97SG17)

作者简介: 黄廷磊(1971-), 男, 安徽肥东人, 讲师, 博士研究生, 曾发表论文十多篇, 主要研究激光测粒技术。

动而带来的测量误差。

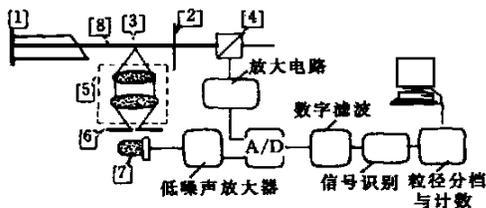


图 1 侧向散射微小粒子计数原理

由 Mie 理论^[2-4]知, 当一束光强为 I_0 、波长为 λ 的单色平面波照射到单个球形颗粒时, 散射角 θ 方向的光强 $I(\theta)$:

$$I(\theta) = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} (i_1 + i_2) \quad (1)$$

式中 r 为散射颗粒到观测点的距离, 强度函数 $(i_1 + i_2)$ 是颗粒的相对折射率 m 、波长 λ 、散射角 θ 和颗粒直径 d 的函数 $(a = \pi d / \lambda)$ 。

$$i_1 + i_2 = |s_1(\theta)|^2 + |s_2(\theta)|^2 = f(a, m, \theta) \quad (2)$$

振幅函数 $s_1(\theta), s_2(\theta)$ 的表达式如下:

$$s_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)]$$

$$s_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n + b_n \pi_n(\cos\theta)] \quad (3)$$

其中系数:

$$a_n = \frac{\Psi_n(a) \Psi'_n(ma) - m \Psi'_n(a) \Psi_n(ma)}{\xi_n^{(1)}(a) \Psi'_n(ma) - m \xi_n^{(1)'}(a) \Psi_n(ma)}$$

$$b_n = \frac{m \Psi_n(a) \Psi'_n(ma) - \Psi'_n(a) \Psi_n(ma)}{m \xi_n^{(1)}(a) \Psi'_n(ma) - \xi_n^{(1)'}(a) \Psi_n(ma)} \quad (4)$$

$$\pi_n(\cos\theta) = p_n^{(1)}(\cos\theta) / \sin\theta$$

$$\tau_n(\cos\theta) = -p_n^{(1)'}(\cos\theta) \sin\theta \quad (5)$$

在式(4)中, $\Psi_n(a) = \sqrt{\frac{\pi k a}{2}} J_{n+1/2}(ka)$,

$\xi_n(a) = \sqrt{\frac{\pi k a}{2}} H_{n+1/2}^{(1)}(ka)$, λ, k, d 分别为波在颗粒周围的介质中的波长、波矢值、颗粒直径。 m 为散射颗粒相对周围介质的折射率。

在实际应用中, 各种光散式颗粒计数装置都是采集散射光在某一空间范围内的光能量, 并由 Mie 理论建立起光能量与粒径之间 ($F-D$) 的关系。对于异轴采光结构的颗粒计数器来说, 整个采光截

面上的光能分布为^[5]:

$$F = \frac{\lambda^2 I_0}{2\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \cdot \sin\theta \cdot \arccos \left[\frac{\cos(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}) - \cos(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}) \cos\theta}{\sin(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}) \sin\theta} \right] d\theta \quad (6)$$

2 数值模拟

根据上述公式, 编写了计算程序, 针对不同粒子的 d, m, θ 得出 $F-D$ 关系图(见图 2、图 3)。

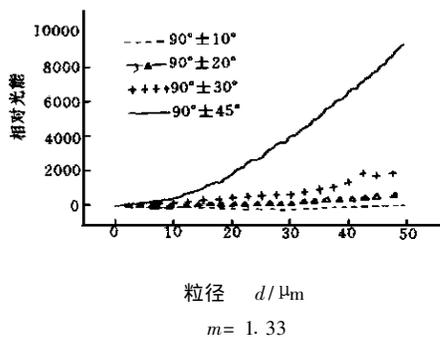


图 2 采光角与 $F-D$ 关系

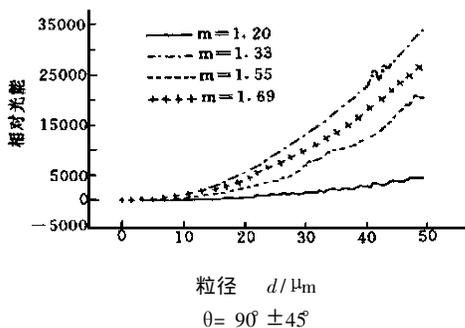


图 3 折射率与 $F-D$ 关系

由数值模拟结果得出如下结论:

- 颗粒粒径和光能之间不是完全的一一对应关系, 有多值性敏感区。
- 多值性关系受采光角度、立体角影响较大。
- 多值性关系受折射率影响。

3 对照实验

在实验过程中, 因缺少标定设备和标准粒子, 故使用的是自制的简易单粒子发生装置, 而且只用了两种标准粒子。因此在实测过程中只能考虑两种粒径情况。表 1 为尘埃计数器仪和实验装置对实

表 1 对照实验结果

国产计数仪		实验装置	
粒径分档 $d/\mu\text{m}$	数量浓度 $C/\text{粒}\cdot\text{mL}^{-1}$	粒径分档 $d/\mu\text{m}$	数量浓度 $C/\text{粒}\cdot\text{mL}^{-1}$
		0.087	180.36
0.3	41.83		
0.5	25.24		
0.7	3.81		
1.0	1.26		
		1.98	1.22
2.0	0.83		
5.0	0.10		

验室内气体采样测试 5 次的平均结果。由表 1 可见对于粒径大于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒, 国产某尘埃计数仪和实验装置测试结果比较接近。但对小颗粒的测量两者之间缺乏可比性。

(上接第 11 页)

4.2.3 积极促进环保型汽车的普及和推广

积极发展污染物排放量少的环保型汽车, 如电车、天然气汽车。对于环保型汽车的研制和开发国家应积极给予支持和援助; 对于购买环保型汽车的单位和个人实行一些优惠政策; 同时向全社会大力宣传, 以促进环保型汽车的普及和推广。

4.2.4 大力发展公共交通事业

据统计, 一列地铁或轻轨可以解决 500 人次~600 人次的出行, 相当于减少 125 辆~150 辆轿车的使用, 其污染物的产生要比使用轿车时少得多。在目前一些大城市人口多、道路拥挤、汽车尾气污染严重的情况下, 大力发展公共交通事业将对改善

4 结束语

可吸入污染物是各种有机化合物、无机化合物和细菌等的重要载体, 污染源也不尽相同, 用上述实验装置能够检测出颗粒物的数量浓度, 为治理空气污染提供了一些必要的参考数据。实验成果的商品化应用还有待于进一步深入研究。

[参考文献]

- [1] 车凤翔. 中国城市气溶胶危害评价[J]. 中国粉体技术, 1999, 5(3): 4-9.
- [2] T. Allen. Powder Sampling and Particle Size Measurement[J]. London, 1997, 349-390.
- [3] L. P. BAYVEL, A. R. JONES. Electromagnetic Scattering and Its Application[M]. England: applied Science Publishers, 1981. 163-179.
- [4] H. C. Van De Hulst. Light Scattering by Small Particles[J]. John Wiley & Sons, New York. 1957
- [5] 王建华. 超净介质中不溶性颗粒光学在线检测技术的理论与实验研究[C]. 上海: 华东工业大学博士论文, 1996.

城市的空气质量起到积极的作用。

[参考文献]

- [1] [日]环境厅环境情报研究会. 环境保全资料总览[M]. 东京: 第一法规出版株式会社, 1996.
- [2] [日]环境厅环境保全关系法令研究会. 环境保全关系法令质疑应答集[M]. 东京: 第一法规出版株式会社, 1996.
- [3] [日]环境厅. 环境白皮书[M]. 东京: 大藏省印刷局, 1996.
- [4] 郑菁英. 汽车尾气催化净化器在中国实用的可能性[J]. 环境保护, 1998, 4: 15.
- [5] 陆书玉. 上海市机动车污染及其控制对策[J]. 上海环境科学, 1998, 17(3): 1.
- [6] 徐家颖, 杨士弘. 广州大气氮氧化物浓度影响因素的灰色关联分析[J]. 上海环境科学, 1998, 17(10): 1.

• 简讯 •

全国环境监测技术管理职能转移至中国环境监测总站

根据国家环境保护总局《关于总局机关部分职能与机构编制调整的通知》(环发[2000]43号)精神, 原属总局监督司的环境监测技术管理职能(包括拟订环境监测技术规范, 管理国家环境监测网, 指导全国环境监测队伍建设和业务工作等)转移至中国环境监测总站, 中国环境监测总站的国控监测网站规划投资建设和归口联系职能划转到总局规划司。

摘自中国环境监测总站《环境监测信息简报》2000年第3期