

大气气溶胶测量仪器 CPMA 综述

房晨

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

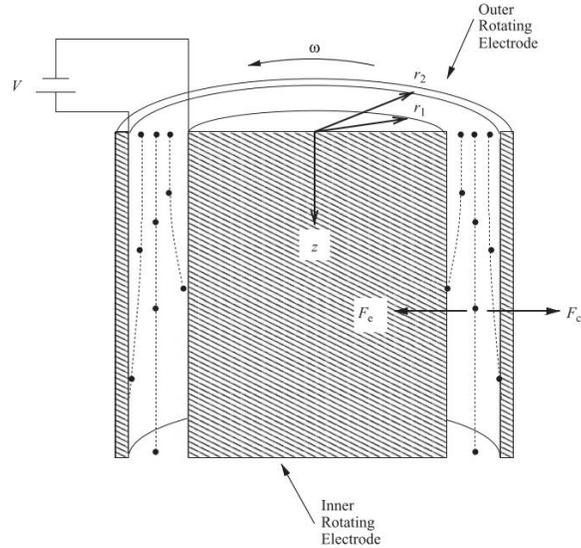
摘要: CPMA 是对气溶胶颗粒按照质量进行分离的一类仪器, 在大气环境监测中有着广泛的应用。本文首先对 CPMA 的主要原理与在环境领域的应用做了简要的介绍, 之后介绍了 CPMA 仪器的前身 DMA, 最后结合仪器研究领域的前沿理论对目前 CPMA 仪器的拓展模型与应用情况进行了概括。

关键词: CPMA APM 气溶胶质量分析 大气环境监测

1、概述: 原理与应用

CPMA (Centrifugal Particle Mass Analyzer, 离心颗粒物质量分离器) 是大气气溶胶领域的一类监测仪器的总称。其主要功能是利用物理学中的离心力与电场力 (centrifugal and electrostatic forces) 的平衡将大气气溶胶中具有不同质荷比 (Mass-to-Charge Ratio) 的颗粒物进行分离, 以此实现气溶胶颗粒物的分离, 便于下一步进行计数与称量等分析。

以 CPMA 仪器类别下的 APM (Aerosol Particle Mass) 为例介绍 CPMA 系列的原理: 通过在内外两个以角速度 ω 同轴旋转的电极施加电压 V , 构造内部电场, 预先带上电荷 q 的颗粒物 (质量为 m) 从上方进入时受到离心力与电场力的双重作用, 运动轨迹可能会因此而偏移, 与内极板或外极板相撞, 无法从下方射出, 而只有特定质荷比的颗粒物能够穿过 APM, 而预先使粒子带电过程中粒子所带上的电荷量 q 是由操作者直接控制的, 因此根据 m/q 与 q 的值即可计算出对应颗粒物的质量, 并借此实现颗粒物的分离。(Ehara, 1995; Ehara, Hagwood, &Coakley, 1996)

图 1 APM 仪器原理图^[1]

根据离心力与电场力的二力平衡列出如下方程式：

$$\textcircled{1} m\omega^2 r = \frac{qV}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

可以推出：

$$\textcircled{2} \omega \propto \sqrt{\frac{q}{m}}$$

由此可见，颗粒物带相同电荷时，转速越大，仪器所能够筛分的质量越小。

CPMA 仪器在气溶胶监测与分析领域有着广泛应用，例如测量气溶胶质量的分布情况（mass distribution），颗粒物的有效密度（effective density）与固有密度（inherent material density）等等，与不同仪器搭配还能实现更复杂的功能，具有重要的监测价值。

2、仪器前身：DMA

相较于离心力，利用电场力对颗粒物进行分离的思路更早地应用于实验仪器的设计中。最初，科学家们考虑利用颗粒物的粒径（Size）性质作为分离的标准，一个早期实现筛分功能的典型仪器是 DMA（Differential Mobility Analyzer）。

DMA 的原理是让大量多分散的 (Polydisperse) 气溶胶粒子同时进入电场, 则之后颗粒物的运动轨迹将会受到背景气流场力、外界电场力以及互相牵引力 (counteracting drag force) 的影响, 而互相牵引力的大小与颗粒物的尺寸大小有关, 因此可以根据不同轨迹 (trajectory) 对不同尺寸的颗粒物进行定性分析。(Hewitt, 1957)

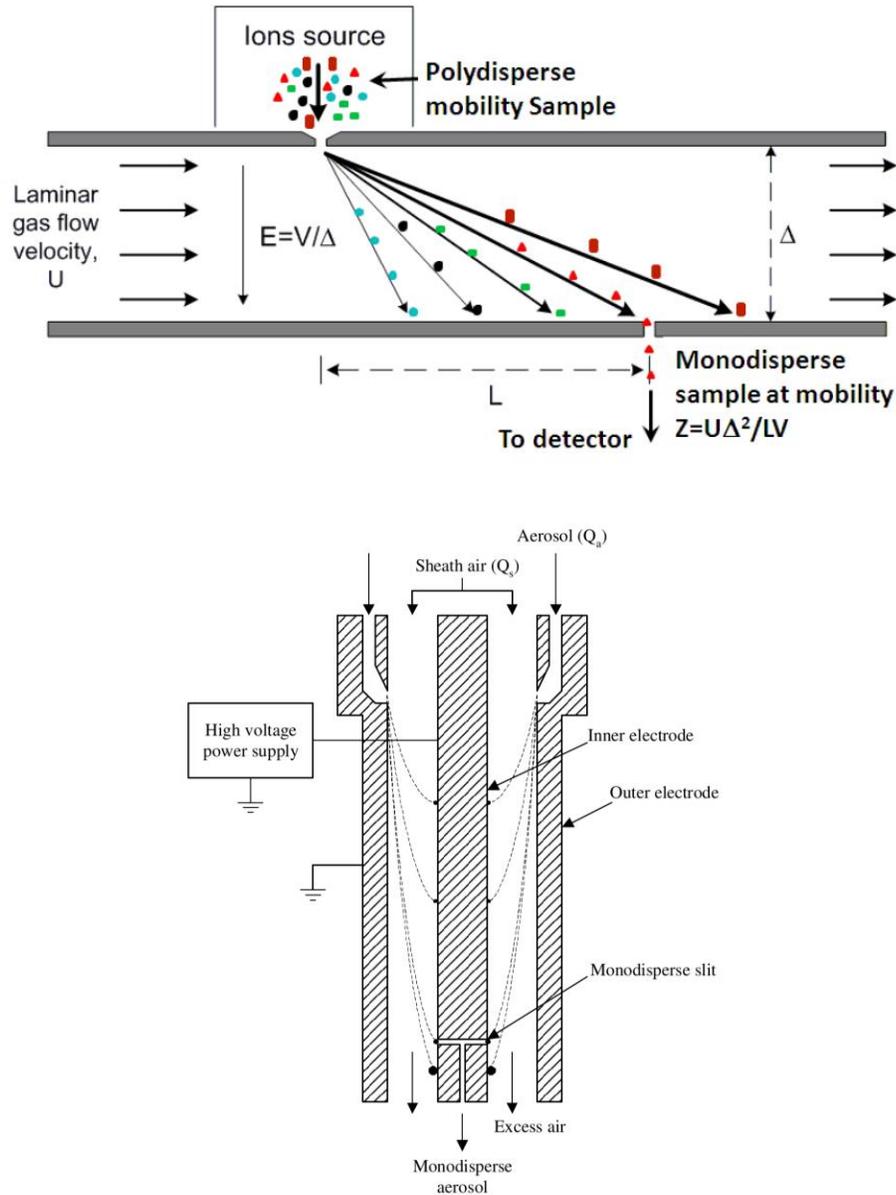


图 2 DMA 原理示意图 (纵向^[3]与横向¹截面)

¹ 摘自网络: <https://www.seadm.com/wp-content/uploads/2016/03/DMA-Technology-Brochure.pdf>

3、拓展的理论模型

APM 应用过程中出现的主要问题是稳定的力导致的颗粒物损失(loss)。由①式可知，随着颗粒物进入仪器时的半径(r ，粒子距离转动轴的距离)的增加，颗粒物受到的电场力会减小，而离心力则会增大。因此对于能够通过仪器的颗粒物而言，会有一部分受力不够平衡，从而打在内外壁上造成损失。

为了解决这种不稳定的力带来的误差影响，科学家们提出了两条改进的思路，一是改变电极的几何结构，利用低而圆的“铲形”(Scooped)电极提供能够随着半径增加而增加的电场(Doric CPMA)；二是适当增加内侧电极的转动速度，从而使得离心力随着半径增加而减小。(Couette CPMA，如图3所示)。两种方式都是希望通过调整仪器的设计实现同种质量的粒子在带上相同电荷后无论从仪器的任何半径位置处进入都能够实现二力平衡的效果。

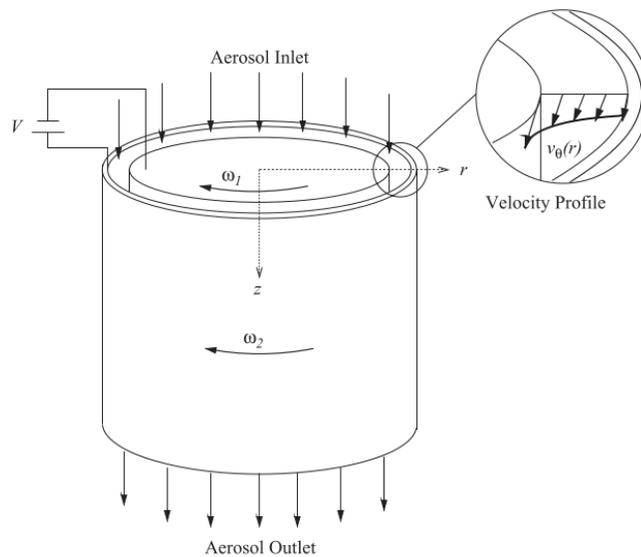


图3 Couette CPMA 仪器原理图^[1]

(正文字数: 483+204+314=1001)

参考文献

- [1] Olfert J S, Collings N. New method for particle mass classification—the Couette centrifugal particle mass analyzer[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2005, 36(11): 1338-1352.
- [2] Olfert J S. A numerical calculation of the transfer function of the fluted centrifugal particle mass analyzer[J]. *Aerosol science and technology*, 2005, 39(10): 1002-1009.
- [3] Intra P, Tippayawong N. An overview of differential mobility analyzers for size classification of nanometer-sized aerosol particles[J]. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 2008, 30(2).