

冲击式分级采样器的设计及标定

王 贤 清

(华东石油学院北京研究生部)

摘 要

为适应国内对冲击式分级采样器研制的需要,本文从冲击器的基本原理及影响捕集效率的主要因素出发,介绍了国外目前用于圆形、矩形喷嘴,单级及串级采样器的设计准则及设计方法,讨论了操作因素对冲击器切割效率的影响。文中还扼要地介绍了冲击器的标定方法。

大气气溶胶中固体或液体悬浮物粒径分布很宽,大约为4—5个数量级。其中小于10微米的微粒由于能进入呼吸系统而将造成对人体的危害,同时,不同粒径的微粒在人体的呼吸系统中运移及沉积的空气动力学行为是不同的;加之,不同粒径微粒的来源不同,元素组成各异,从而对人体的危害程度亦不同。因此,对大气气溶胶微粒进行分级就十分重要,它亦是环境化学研究的重要基础。

气溶胶微粒可以用不同的方法来分级,但是由于大气气溶胶冲击式分级采样器(下称冲击器)结构简单、切割性能好、粒径分割范围较宽(从几十微米至零点几微米)以及它能直接在操作条件下取样并分级,因此国外已广泛用于空气中悬浮物的捕集,烟道气尘粒的取样,它更是环境监测及环境化学研究的一种重要手段^[1]。近年来,由于环境保护、卫生、化工、冶金、国防等方面的需要,我国也开始研制并试生产了一些规格的冲击器^[2,3,4],对于冲击器的理论研究也在着手进行^[5]。

基 本 原 理

冲击器的简单结构,如图1所示,从喷嘴来的载有微粒的气流,直接喷向撞击板,使气流发生改向折转,若微粒的密度相同,由于大小(粒径)不同,其运动时的惯性也不同。当气流改向时,较大的微粒由于惯性大,能越过气流流线的轨迹而冲撞在撞击板上。较小的微粒由于惯性较小,仍能随气流改向运动而进入第二级冲击器,第二级冲击器设计成较第一级具有更小的喷嘴直径,这就增加了气流的流速,也就增加了微粒的惯性,因此,一部分较小直径的微粒,又在第二级被捕集下来,如此一级一级地分离下去,最后对那些太小而不能在最后一级被捕集的微粒,则由冲击器末端的过滤膜捕集。冲击器根据需要,可设计成4级、6级以至12级,冲击器喷嘴的形状,可为圆形、矩

形。喷嘴数可为单一喷嘴或多喷嘴。

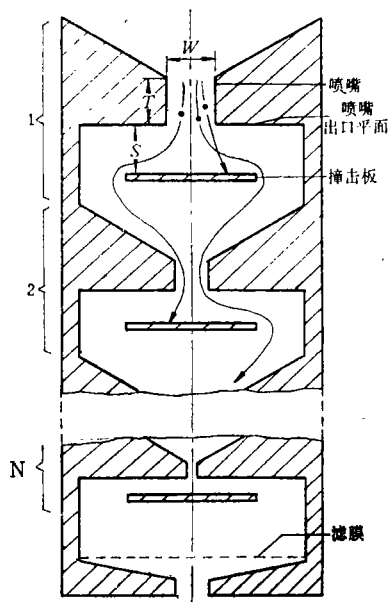


图1 不同粒径的微粒在冲击器运动轨迹示意图

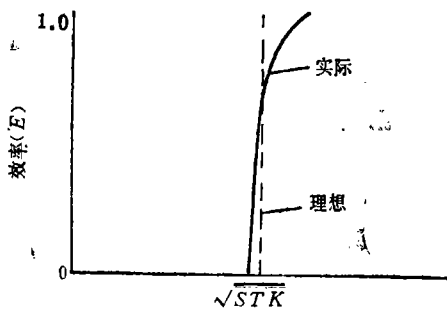


图2 典型冲击器的效率曲线

每一级冲击器的最重要的特性为捕集效率曲线。它标绘出了粒径(或空气动力直线)与捕集效率的函数关系。在理想情况下,每一级冲击器能把大于某一定尺寸的微粒全部分割下来,如图2中虚线表示的那样。实际冲击器的切割特性则如图2中实线所示,但它仍切割得很好。Marple和Liu^[6]在作了大量研究后指出,如果能满足下述两点要求时,则能获得理想的冲击器。

(1) 在喷嘴出口至撞击板的区域内,流体在Y方向的分速度,仅仅是Y的函数(Y平行于喷嘴的中心线,见图3)。

(2) 在喷嘴出口处,微粒在Y方向的分速度,在喷嘴截面上是均匀的。

若在喷嘴出口平面上微粒的运动速度与气流速度相等,则以上两点要求就合并成第一点了。在一个设计良好的冲击器中,这一要求大体上是能满足的,这从图3的矩形喷嘴速度流场

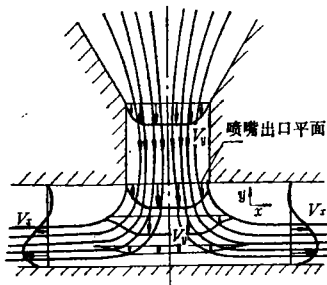


图3 矩形冲击器中流体的流场
($S/W = 1, T/W = 1, Re = 3000$)

的分布中可以看出,垂直于喷嘴出口平面的分速度 V_y ,在喷嘴的大部分区域与它离开中心线的距离 X 是无关的,但是,这一要求在靠近喷嘴壁面时,由于层流边界层的存在,并不能得到满足。这就是实际切割特性偏离理想效率曲线的原因。

冲击器的设计

冲击器的设计,在文献中已有大量报导,其中多数是根据实验研究得出的数据来进行的^[7,8,9]。但同时,也有不少理论研究^[10,11,12,13,14]。所有这些研究都为冲击器的设计提供了可靠的资料。

1. 影响切割效率的参数

理论及实验研究表明,冲击器切割特性是受流体的速度流场所控制,而流场则可用 Navier-Stokes 方程组来描述。Marple 等人^[15,16]在求解该方程组时发现,速度场是冲击器的物理形状,以及流体通过喷嘴时的雷诺数 Re 的函数。以喷嘴水力直径为基础所表示的雷诺数,则由下式定义:

$$\text{对圆形喷嘴} \quad Re = \frac{\rho V_0 W}{\mu} \quad (1)$$

$$\text{对矩形喷嘴} \quad Re = \frac{\rho V_0 2W}{\mu} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度;

V_0 为流体在喷嘴喉部的平均速度;

W 为喷嘴的直径(对圆形喷嘴)或宽度(对矩形喷嘴);

μ 为流体的粘度。

微粒在流场中的运动轨迹,决定了该微粒是否能被撞击板所捕集。它可由求解微粒运动方程得到^[6]。该方程的解为微粒的 Stokes 数以及决定流体流场的参数的函数。Stokes 数(STK)定义为微粒的空气动力终止距离(Aerodynamic Stopping Distance)与冲击器喷嘴喉部半径(或半宽)之比。

$$STK = \frac{\rho_p C V_0 D_p^2 / 18 \mu}{W/2} \quad (3)$$

式中: ρ_p 微粒的密度;

C Cunningham 滑动校正因素;

D_p 微粒之直径。

因此, Stokes 数的平方根 $\sqrt{STK}$ 则为无因次微粒。

于是,冲击器的捕集效率则为 Stokes 数、雷诺数以及冲击器的物理形状的函数。实验研究也证实了^[17],对于圆形或矩形喷嘴的物理形状,主要是指喷嘴的直径或宽度 W 、喷嘴出口处至撞击板的距离 S 、以及喷嘴喉管部分的长度 T 。由于 Stokes 数、雷诺数为无因次数,因而常把上述的几何尺寸也用单位喷嘴的直径或宽度来表示,如 S/W , T/W , 从而得到一些无因次的量,这在归纳数据时就很方便。

图 4 的 a、b、c 标绘了 S/W 、 Re 、 T/W 对捕集效率 E 的影响。 E 是通过喷嘴、具有无因次粒径值 $\sqrt{STK}$ 的全部微粒中被捕集的百分数。从图 4 可以看到:

(1) 除了低雷诺数($Re < 500$)或极大雷诺数($Re = 25000$)的情况下,所有效率曲线的形状都是相似的。对于低雷诺数,切割特性之所以变坏,是由于在冲击器喷嘴的壁面附近有着一层较厚的层流边界层,而高雷诺数效率曲线的下部有一“膝状”弯曲,这是由于在撞击板表面有一层很薄的边界层,其厚度相当于微粒的直径。这就允许较小的微粒较之边界层厚时易撞击在板上。

(2) 在以效率与 $\sqrt{STK}$ 值作标绘的图上,除了当 S/W 与 Re 的值较小时外,效率曲线的形状与 S/W 及 Re 的关系并不很大,从图 5 中可以更清楚地看到这一点。对于矩形喷嘴只有在 $S/W < 1.0$ 、圆形喷嘴 $S/W < 0.5$ 时, $\sqrt{STK}_{50}$ 才随着喷嘴与撞击板间的距

离的减小而迅速降低。 $\sqrt{STK_{50}}$ 的定义为捕集效率为50%的微粒（亦称50%切割点）的 $\sqrt{STK}$ 值。与其相应的为捕集效率为50%的空气动力直径 D_{50} ，它通常用作冲击器的设计及判别操作性能好坏的主要指标。

（3）喷嘴喉部长度 T 对切割性能影响不大，如图4（c）所示。特别是对于有锥形入口的冲击器喷嘴更是如此。在没有锥形入口时，过短的喉管可能没有足够的时间，使微粒加速至与气流相同的速度，这样使效率曲线的形状有所改变。

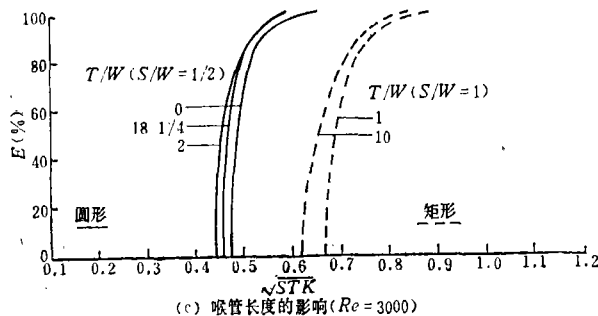
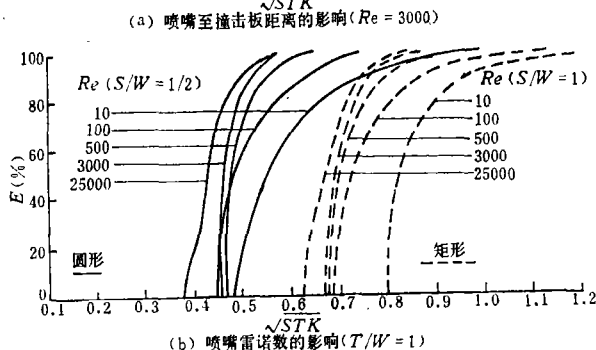
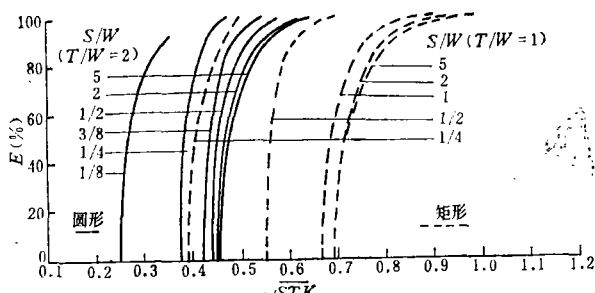


图 4 喷嘴几何结构及雷诺数对圆形、矩形冲击器效率曲线的影响

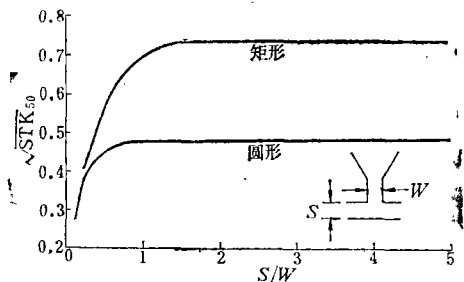


图 5 冲击器50%切割点与 S/W 的关系 ($Re = 3000$)

2. 设计准则

综前所述, 作为冲击器的设计准则为:

- (1) $S/W = 1.0$ (圆形喷嘴); $S/W = 1.5$ (矩形喷嘴);
- (2) $T/W > 1.0$;
- (3) Re 应处于 500 至数千的范围内。

以上这些准则是为了使所设计的冲击器具有良好的切割特性所要求的。

3. 多喷嘴冲击器的设计

有时为了满足从含微粒浓度较小的气体中一次取得较多的样品, 以作为微粒的化学成份分析等用途, 就要求设计大流量采样器。它往往设计成矩形或圆形的多喷嘴形式。例如 Andersen 大流量采样器。有时为了得到合理的喷嘴出口雷诺数及切割性能, 也有将小流量采样器的喷嘴分成数个的。例如 Sierra 仪器公司的 Series 210 型冲击器。它的每一级均由沿径向辐射状分布的四个矩形狭缝喷嘴构成。对于这种多喷嘴的冲击器的设计, 基本上与单喷嘴冲击器相同。因此, 以上设计准则也同样适用。

(1) 圆形多喷嘴冲击器 通过喷嘴的设计雷诺数 Re , 可用在每一级装设 N 个同样的喷嘴来控制。每一喷嘴中气流的平均速度 V_0 为:

$$V_0 = \frac{4Q}{\pi N W^2} \quad (4)$$

式中 Q 为通过某一级的总体积流量。但应注意, 在串联冲击器中, 由于压降的存在, 当气体密度下降时 Q 则增加。将上述平均流速代入 (1) 式及 (3) 式得:

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi N \mu W} \quad (5)$$

$$STK_{50} = \frac{4\rho_p Q C D_{50}^2}{9\pi N \mu W^3} \quad (6)$$

式中 D_{50} 捕集效率为 50% 时微粒的空气动力直径。若从 (5) 及 (6) 中消去 W , 则得:

$$Q = \frac{\pi}{12} \left(\frac{\rho_p}{STK_{50}} \right)^{1/2} \left(\frac{Re}{\rho} \right)^{3/2} N \mu \sqrt{C D_{50}} \quad (7)$$

在假设微粒密度为 1 克/厘米³ (若不为 1, 则可经转化, 用空气动力直径计算), 流体为空气, 并处于常温 (25°C)、常压下时 ($\rho = 1.205 \times 10^{-3}$ 克/厘米³, $\mu = 1.81 \times 10^{-4}$ 泊), 由于 STK_{50} 为 Re 的函数, 因此式 (7) 可用图表来表示。图 6 即为用于圆形喷嘴冲击器设计的这种图表。当然, 若温度与压力的条件与假设的不同, 则图 6 中的曲线只能作为初步的近似计算。图 6 是对于 $S/W = 1$ 、 $T/W = 1$ 及 $Re = 500$ 、3000、10000 下做出的。从图 6 中也可以看到参数 $\sqrt{C D_{50}}$ 与特定的 W 值之间的对应关系, 该关系是从方程式 (5) 及 (6) 中消去 Q/N 得到:

$$W = \sqrt{\frac{\rho_p Re}{9\rho STK_{50}}} \sqrt{C D_{50}} \quad (8)$$

(2) 矩形多喷嘴冲击器 相似的方法也可用于矩形多喷嘴冲击器的设计。这时, 应以喷嘴的总长度 L 代替圆形喷嘴冲击器的喷嘴数 N 。因此, 喉管部份的平均气流速度 V_0 , 可按下式定义:

$$V_0 = \frac{Q}{LW} \quad (9)$$

雷诺数及Stokes数则分别为:

$$Re = \frac{2\rho Q}{\mu L} \quad (10)$$

$$STK_{50} = \frac{\rho_p Q C D_{50}^2}{9\mu L W^2} \quad (11)$$

由于 W 并未在表达式(10)中出现,就不能象处理圆形喷嘴那样从方程(10)及(11)中消去 W 。但若在喷嘴宽度为 W 的矩形冲击器中,体积流量用单位喷嘴长度来表示,参数 Q/L 与 W 的关系在将 $\sqrt{C}D_{50}$ 作参数时,可由方程式(11)标绘而得。如图7所示。方程式(11)中的 STK_{50} 值是 Re 的函数(见图4),在方程式(10)的定义中它也是 Q/L 的函数。 Re 的相应值也表示在图7中。该图是以 $S/W = 1.5, T/W = 1$ 标绘。

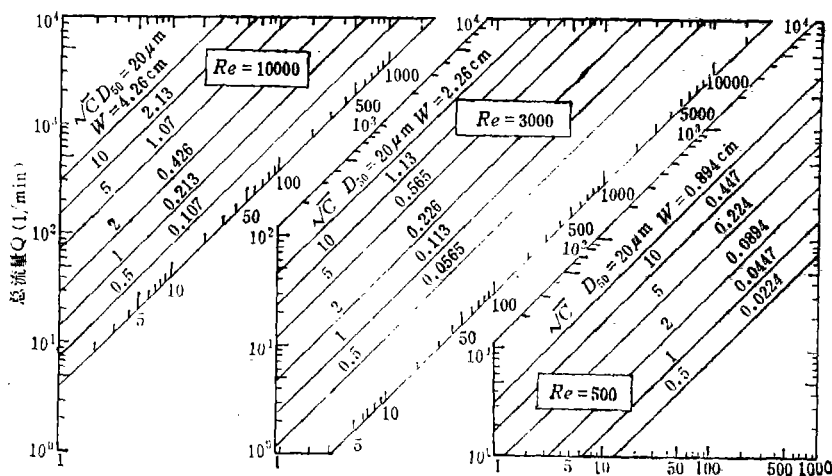


图6 圆形冲击器设计图 (D_{50} = 切割效率为50%时之空气动力直径)

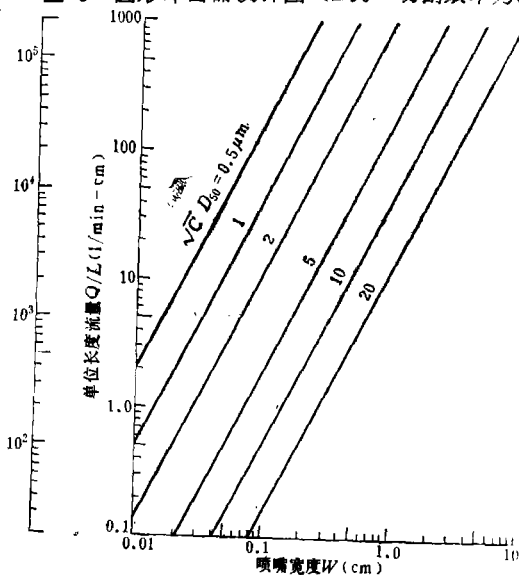


图7 矩形冲击器设计图
(D_{50} = 切割效率为50%时
之空气动力直径)

操作因素的影响

要从冲击器得到可靠的数据,就必须知道它的一些限制。例如在超越出设计图表及效率曲线规定的条件下使用时,就要特别小心。另外还要知道冲击器的入口效率,这样才能得到正确的测定结果。至于微粒在冲击器壁、级间的损失以及在撞击板上的反弹,均影响它的粒径分布。

1. 冲击器的入口损失

由于气流中的微粒在取样过程中与采样器外壁面撞击,在进入采样器后,又可能因气体的紊流与内壁撞击以及沉降等均可造成微粒在分级前的损失。为了得到准确的粒径分布和浓度,就需要知道冲击器的入口效率^[18]。

Agarwal^[19]的研究表明,在静止的空气中较大微粒(可大至100微米)几乎能以100%的效率被吸入。但在流动气流下取样时,其入口效率就大大降低了。Zebel^[20]在有风情况下采样时,对采样器的外形及效率作了较详细的研究。Liu 及 Pui^[21]在采样器的研究中,对入口效率作了全面的定义。总之,若冲击器是从流动的气流中取样。例如在有风的大气中、烟道、烟囱中等,为了减少采样器入口的损失,应当采用等动取样这一条件。

2. 级间损失

级间损失通常是指微粒撞击在级间以及喷嘴的内壁面而造成的损失,至今尚无一种理论可以预测这种损失。因此,它往往要用实验来加以确定。

Rao^[22]及 Willeke^[13]等对已商品化了的三种常用的冲击器作了详尽的实验测定。图8中示出了这一结果。研究证明冲击器的级间损失是微粒的空气动力直径的函数。损失是以进入冲击器的总微粒的百分率表示的。

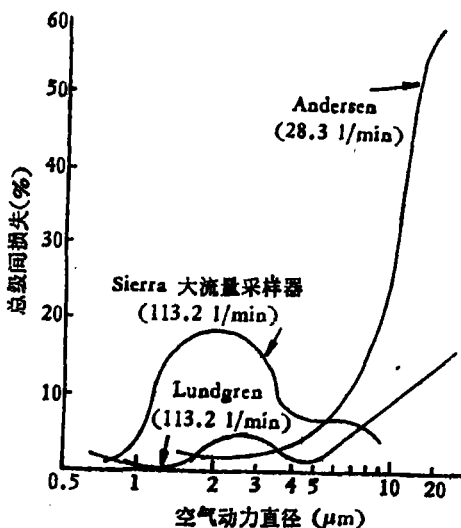


图8 Andersen(圆形多孔), Lundgren(单缝)及Sierra(多缝)冲击器的总级间损失

分析图8还可以看出,对于Lundgren和Andersen冲击器,当粒径小于5微米时,级间损失并不严重,而对于大粒径则损失增加很快。然而对于Sierra冲击器,小于5微米的微粒损失则很可观。对于矩形喷嘴,级间损失主要发生在喷嘴两侧壁面上。这显然是由于进入的流体的侧向撞击所造成。采用锥形入口就减少了这种损失。

3. 微粒的再进入气流(反弹及吹走)

由于微粒在撞击板上的反弹或被气流重新吹走,均使得微粒又回到气流中。其结果,对于单级冲击器使得所收集微粒的浓度偏小。对于串级式冲击器则使粒径分布产生误差。

微粒再进入气流的程度,与微粒类型及

撞击板的性质有关。液体微粒将被捕集在任何类型的撞击表面上,而再进入气流的可能性是很小的。固体微粒的再进入系统的程度与所采用的撞击表面的关系很密切。在采用干燥、平滑的表面时再进入的量最大。而当采用粘性表面时再进入量就很小。这时,常采用粘性涂料(阿匹松真空脂、凡士林等)。但也应注意不要使微粒在撞击板上“过载”,否则会使后来的微粒撞击在沉积的微粒上面而不是粘性表面上。

纤维滤膜也常用作撞击表面,纤维本身能提供一个很大的表面积并对微粒有一定的吸附作用。纤维间的空隙则有减少微粒再进入气流的作用。若对所捕集的微粒作进一步的化学成份分析时,应注意选择低杂质含量的纤维滤膜。Dzubay 和 Stevens^[23]发现玻璃纤维滤膜不能用于X-荧光分析,而用具有0.8微米孔径由纤维素酯混制成的滤膜则很好。

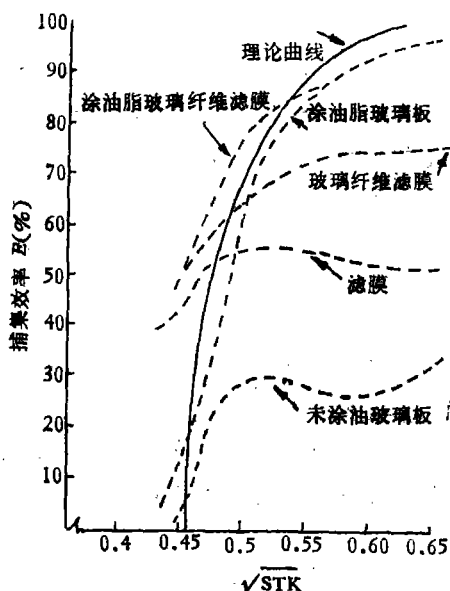


图9 采用不同捕集表面在单级冲击器上测得的效率曲线

图9中示出了不同撞击表面对捕集效率的影响^[22]。它是用弹跳性能很强的聚苯乙烯乳胶发生的标准气溶胶球形微粒测定的。从图9可以看出涂有油脂的玻璃表面,基本上没有反弹发生。它和理论计算所得的效率曲线十分吻合,捕集效率几乎可达100%。另一极端是未加涂料的玻璃板,当 $\sqrt{STK}$ 约大于0.47时,反弹十分严重,其最大的捕集效率约为30%。在用纤维滤膜时捕集效率界于两者之间,其切割性能变坏。

冲击器的标定方法

在研制及使用冲击器时,对于它的切割性的优劣常需要通过标定来进行估价。May^[24]在最早的冲击器的研制中,是用光学显微镜计数法,即对捕集样品按粒径范围计数并作统计计算。这种方法目前仍在使用的。

光学计数器法^[25]则是近来用得比较普遍的一种方法。它是利用不同粒径微粒的光散射强度不同,将不同强度的光信号转化成不同强弱的电信号。在测定的同时加以记录、储存并以数字形式输出。因此,将它连接在冲击器前后即可测得粒径及数目分布和浓度。但这种光学计数器最终仍需用标准微粒来加以标定。

荧光标准微粒法是由Liu等人^[26]研究气溶胶微粒在紊流气流中的沉降情况时首先应用的。Rao及Whitby^[27]曾用来研究过冲击器非理想性问题。它是将适量的荧光物加入欲产生标准微粒的物质中配制成一定浓度的溶液,再经振动锐孔单分散性气溶胶发生器^[28]产生标准粒径的荧光性微粒。这种微粒被捕集在撞击板上后,可用适当的提取剂提取出其中的荧光物、然后进行荧光比色分析。作者与Liu和Pui^[29]曾对荧光物和提取剂的选取及操作程序等作过系统的研究,使这一方法更加完善。这种方法简单、准确、而且还可将微粒在冲击器各部位的损失定量地测定出来。

结 语

冲击器已成为气溶胶微粒的粒径分布及浓度测定的重要工具,国外在七十年代曾作过大量的实验和理论研究。

冲击器的性能除了可以用实验方法测定外,还可以根据微粒在流体中运动以及描述流体流场的方程式,用电子计算机求解。理论解和实验结果相当吻合。这种解已制得了可供设计使用的图表。

尽管冲击器的切割性能很好,但若对其结构设计或操作不当,例如,级间损失及反弹等仍将严重地影响其捕集效率。因此选择适当的撞击板材料涂料(或撞击表面),特别是使它能在苛刻条件(如高温及压力下)采样是值得研究的。

冲击器的标定方法是当前研制冲击器的关键所在。现有的标定方法中,应用荧光性标准微粒的方法是值得重视的。

参 考 文 献

- [1] Liu, B.Y.H. et al., *Environ. Sci. and Technol.*, 14, 392(1980).
- [2] 上海化工研究院旋风分离器研究专题组, 化学工程, (2), 55(1981).
- [3] 中国科学院环境化学研究所、力学所, LH-1 型大气飘尘多级单孔冲击式采样器研究报告, 1982年12月。
- [4] 郭进军、陈廷伟、牛秋明, HV-A 型大流量空气采样器分级采样装置研制报告, 北京市环境保护科学研究所, 1982年10月。
- [5] 刘大有, 环境科学学报, 3, 319(1983).
- [6] Marple, V.A. and Liu, B.Y.H., *J. Colloid and Interface Sci.*, 53, 31(1975).
- [7] Ranz, W.E. et al., *Ind. Eng. Chem.*, 44, 1371(1952).
- [8] Mercer, T.T. et al., *J. Colloid and Interface Sci.*, 22, 75(1968).
- [9] Mercer, T.T. et al., *Ann. Occup. Hyg.*, 12, 41(1969).
- [10] Andersen, A.A., *J. Amer. Ind. Hyg. Assoc.*, 27, 160(1966).
- [11] Lundgren, D.A., *J. Air Pollution Control Assoc.*, 17, 225(1967).
- [12] Marple, V.A. et al., *Environ. Sci. and Technol.*, 8, 648(1974).
- [13] Willeke, K., *J. Colloid and Interface Sci.*, 53, 121(1975).
- [14] Willeke, K., *J. Amer. Ind. Hyg. Assoc.*, 36, 683(1974).
- [15] Marple, V.A. et al., *ASME J. Fluid Eng.*, 96, 394(1974).
- [16] Marple, V.A., *J. Aerosol Sci.*, 5, 1(1974).
- [17] Marple, V.A., *Ph.D. Dissertation*, University of Minnesota, Particle Technology Laboratory Publ., 144, 1970.
- [18] Fuchs, N.A., *Atmospheric Environment*, 9, 697(1975).
- [19] Agarwal, I.K., *Ph.D. Thesis*, University of Minnesota, Particle Technology Laboratory, Publ., 265, 1975.
- [20] Zebel, G., *Recent Developments in Aerosol Science*, (Edited by D.T. Shaw), 1978.
- [21] Liu, B.Y.H. et al., *Atmospheric Environment*, 15, 589(1981).
- [22] Rao, A.K., *Ph.D. Thesis*, University of Minnesota, Particle Technology Laboratory, Publ., 269, 1975.
- [23] Dzubay, T.G. et al., *Environ. Sci. and Technol.*, 9, 663(1975).
- [24] May, K.R., *J. Sci. Instrum.*, 22, 187(1945).
- [25] Copper, D.W. et al., *Atmospheric Environment*, 8, 122(1974).
- [26] Liu, B.Y.H. et al., *Aerosol Sci.*, 5, 145(1974).
- [27] Rao, A.K., *J. Aerosol Sci.*, 9, 87, (1978).
- [28] Berglund, R.N. and Liu, B.Y.H., *Environ. Sci. and Technol.*, 7, 147 (1973).
- [29] 王贤清, Liu, B.Y.H., Pui, D.Y.H., 化工学报, (3), 246 (1983).

1984年2月30日收到。