

# 多孔冲击式分级采样器的流体力学分析及参数设计

朱芙蓉 刘大有 林烈 朱宗厚

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 本文描述了多孔冲击式采样器的工作原理,用流体力学方法作了分析计算,并提出了参数设计方法。最后将实验结果和理论作了比较。用本文所述方法设计的 HFS-1 多孔采样器,经测试性能达到国家标准。

**关键词** 冲击式收尘,大流量,流场分析,参数设计

## 一、引言

大容量冲击式采样器是大气环境监测仪器。它是利用空气动力学原理将大气飘尘按粒径大小分级采集,以探测大气中不同粒径尘埃的分布情况。自从 1945 年 May<sup>[1]</sup> 发明第一台多级冲击式采样器以来,至今已有四十年历史。在此期间,已有各种形式的商品采样器问世,也有大量的采样器研究方面的文章发表<sup>[2-7]</sup>。

国内关于冲击式采样器的深入研究是八十年代开始的。1982 年由中国科学院力学研究所和环境化学研究所联合研制成功的 LH-1 型采样器<sup>[6,7]</sup>,填补了国内空白,为进一步研制大容量冲击式采样器奠定了基础。

对于冲击式采样器,其工作气流速度不宜过大,否则会造成飘尘中大颗粒破碎从而增加采样误差等问题,而且对采样泵的压头要求大大提高,所以一个孔的流量是很有限的。在某些场合,希望采用大流量采样器以便在较短时间内采集足够的样品提供分析,故继 LH-1 型采样器研制成功后,中国科学院力学研究所又进行了多孔大容量冲击式采样器的研制。为此,首先需对多孔冲击式采样器的流体力学原理进行分析计算,以提出采样器参数设计方法。

## 二、采样器工作原理

冲击式采样器是利用含尘空气射流垂直冲击采集平板时不同粒径和密度的颗粒在流场中有不同运动轨迹的特性,达到分级采集飘尘的目的。图 1,2 分别是单孔及多孔冲击式采样器流动示意图。当气流通过射流孔  $o'$  冲向采集平板  $G$  时,气流速度的大小和方向都发生变化,射流中的大颗粒由于惯性而偏离流线并与采集板  $G$  相撞而被采集,射流中较小颗粒仍跟随气流流向下一级射流孔。随着射流孔径  $D$  的减小,射流速度就增大,粒子的惯性效应亦相应增大,所以越来越小的颗粒被迫离开流线而被各级采集板所采集,从而达到了按粒径分级采集的目的。

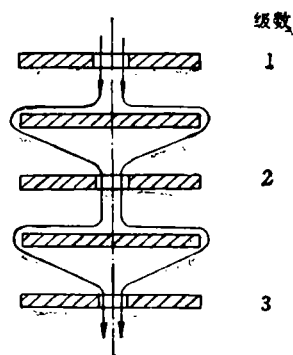


图 1 单孔分级采样器示意图

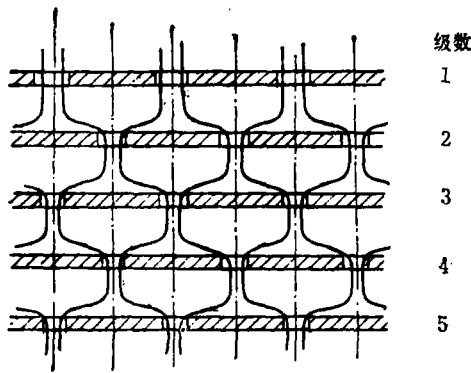


图2 多孔分级采样器示意图

### 三、流场分析和计算

首先将多孔采样器的流动状态与单孔采样器的流动状态作一对比。比较图1和图2后可以发现,对于单孔采样器,它只有一股射流,射流冲击采集板后流向四周,然后再汇拢进入下一级射流孔。由于相对射流孔径而言采集板很大,对于直径约为二倍孔径 $D$ (气流中的尘埃主要撞击在采集板的这个区域内<sup>[6]</sup>)的采集板中心区域而言,采集板的边缘效应可以忽略不计,因此可以直接引用“圆射流冲击无限平板”的计算结果<sup>[6]</sup>进行参数设计。对于多孔采样器,它是由多股射流同时冲向多孔采集板,该板是上一级的采集板又是下一级的射流孔板。若该板孔距很大,下一级各射流孔都远离上级射流,那么它仍可象单孔采样器一样,可利用<sup>[6]</sup>的计算结果。但为了使结构紧凑,各射流孔距不可能很大,所以必须研究采集板上各射流孔对上级射流孔冲击平板的流场所产生的影响。下面将给出不同孔距时对上级流场引起的扰动大小,从而确定这个影响可以忽略时的最小孔距。

若各射流孔均按正方形对称排列,孔距为 $a$ ,则由孔的对称分布可知,各个射流(如射流 $o'$ )的流动仅局限于六面体 $ABCD A' B' C' D'$ 中(见图3)。其中 $A, B, C, D$ 表示下一级射流孔板上的孔的位置, $A', B', C', D'$ 为 $A, B, C, D$ 在上一级射流孔板上的投影。六面体内任一点 $M(x, \theta, y)$ 的速度势 $\Phi_M$ 可以表示为<sup>1)</sup>:

$$\Phi_M(x, \theta, y) = \Phi_0(x, y) + \varphi_M(x, \theta, y) \quad (1)$$

$x, \theta, y$ 是以 $o$ 为原点,即以射流 $o'$ 的轴线与平

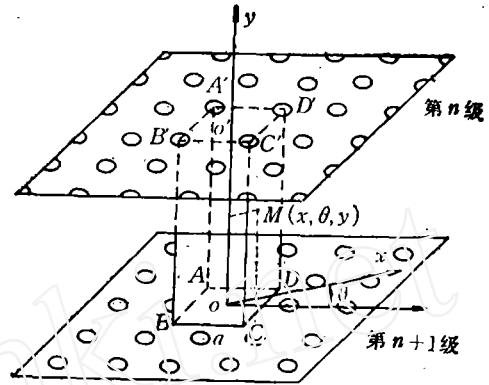


图3 座标系

面 $G$ 的交点为原点的柱坐标系。 $\Phi_0$ 为射流 $o'$ 冲击无限平板时 $M$ 点的速度势, $\varphi_M$ 是由四个 $1/4$ 孔 $A, B, C, D$ 在 $M$ 点造成的附加速度势。设射流 $o'$ 的出口速度 $V = 1$ ,孔径 $D = 2$ ,则孔 $A, B, C, D$ 对六面体 $ABCD A' B' C' D'$ 内流动的影响相当于强度各为 $-\frac{\pi}{4}$ 的四个点源。

$\varphi_M(x, \theta, y)$ 的表达式很复杂,但 $\varphi_M$ 对 $\theta$ 的平均值 $\bar{\varphi}_M \left( = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi_M d\theta \right)$ 可用轴对称源汇公式表达如下:

$$\bar{\varphi}_M(x, y) = \frac{q_t}{\pi} \cdot \frac{E(\xi)}{\rho} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{x_1 x}{\rho^2} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{1}{2} (r_1 + r_2) \quad (4)$$

$$r_{1,2} = \sqrt{(x_1 \mp x)^2 + (y_1 - y)^2} \quad (5)$$

$$E(\xi) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\sigma}{(1 - \xi^2 \sin^2 \sigma)^{1/2}} \quad (6)$$

其中 $q_t$ 为轴对称源强度,即单位平面角内源的强度,现 $q_t = -\frac{1}{2}$ 。 $x_1$ 为源的径向坐标。当源的位置取在孔的中心时, $x_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a$ , $y_1$ 为源的轴向坐标,现 $y_1 = 0$ 。

当 $M$ 位于采集平面 $G$ 上时,平均附加速度

1) 实际上,由于定解问题中等压射流边界的位置未知,叠加原理并不严格成立。但本文感兴趣的是采集板中心附近的流场,离射流边界较远,故(1)近似成立。

势  $\varphi_M$ 、相应的径向速度  $u$  及轴向速度  $v$  为:

$$\varphi(x, 0) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi a}} E(\sqrt{2x/a}) \quad (7)$$

$$u(x, 0) = -\frac{1}{\pi a^2} E'(\sqrt{2x/a}) \quad (8)$$

$$v(x, 0) = 0 \quad (9)$$

由文献 [6] 已知, 当含尘气体冲击采集板时, 其颗粒主要集中在  $x/\left(\frac{D}{2}\right) \leq 2$  区域内, 故现取  $x=2$  来估计四孔  $A, B, C, D$  对  $x/\left(\frac{D}{2}\right) \leq 2$  区域的扰动大小。表 1 及图 4 给出不同孔距  $a$  时, 在  $x=2$  点的附加速度  $u$ 。

若扰动源取在孔  $A, B, C, D$  的边缘近射流的一侧时, 则  $x_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a - \frac{D}{2}$ , 这时不同孔距  $a$  与附加速度  $u$  的关系也列于表 1 及作于图 4 上。

表 1  $x=2$  时孔距  $a$  与附加速度  $u$  的关系

$u(2,0)/V$		0.045	0.018	0.009	0.005
$a/D$	$x_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a$	1.8	2.1	2.5	2.8
	$x_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} a - \frac{D}{2}$	2.5	2.8	3.2	3.5

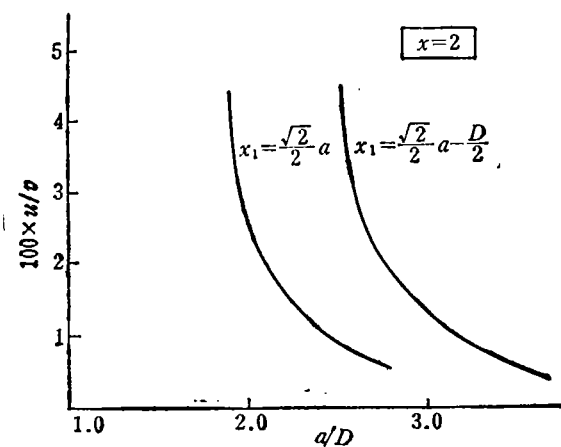


图 4 相对孔距  $a/D$  与相对附加速度  $u/v$

由计算结果可知, 当  $a/D > 2.8 \sim 3.5$  时, 由于孔  $A, B, C, D$  的存在, 在  $M$  点所产生的附加速度分量  $u$  仅为射流出口速度的 0.5%。因

此, 可以忽略它们的影响。

#### 四、设计方法

由上面分析计算已得到, 当  $a/D > 2.8 \sim 3.5$  时, 在多孔采样器的设计中, 仍可用 [6] 的计算结果。因此, 多孔采样器的参数设计方法, 可类似于单孔采样器的参数设计方法<sup>[4]</sup>:

1. 孔数  $N$ : 它由总流量  $Q$  和每孔流量  $q$  决定。各级的孔数可以不同, 但为了布置和排列方便, 一般可取孔数相同。  $N$  由下式计算:

$$N = \frac{Q}{q} \quad (10)$$

2. 孔距  $a$ : 可取  $a$  为 3—4 倍本级孔径。若各级孔数相同, 孔距也取相同, 那么  $a$  取为 3—4 倍第一级孔径。

3. 排列: 在满足孔径和孔距以及对称性等要求的前提下, 孔的排列可随意。也可取图 2 所示的交叉排列。

4. 孔径  $D_i$ : 类似单孔采样器, 由下述公式确定:

$$D_i = \left( \frac{2Q\rho_p d_{i50}^2 \omega_i}{9\pi N \mu S_{i50}} \right)^{1/3} \quad (11)$$

$$\omega_i = 1 + 2.46\lambda/d_{i50} \quad (12)$$

$$Q_i^* = \frac{72\rho^2 Q}{\pi \rho_p N \mu D_i \omega_i} \quad (13)$$

其中  $S_{i50}$  是相对采集几率  $p=50\%$  时的  $S_i$  值 (见图 5)。  $S_i$  是斯托克斯数, 是弛豫时间  $\tau_r$  与流动特征时间  $D/V$  之比。  $d_{i50}$  是第  $i$  级的切割粒径, 即相对采集几率  $p=50\%$  时颗粒的直径。  $\lambda$  为气体分子平均自由程。  $\omega_i$  为稀薄气体效应的修正因子。  $\rho$  为空气密度,  $\rho_p$  为颗粒材料密度,  $D_i$  为第  $i$  级的孔径。  $\mu$  为空气动力粘性

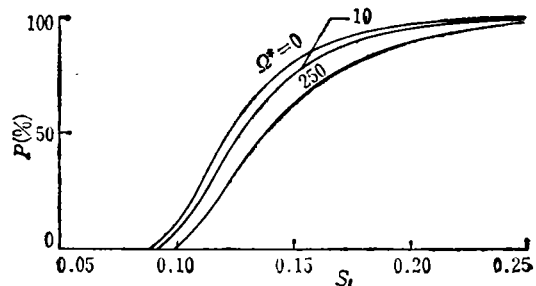


图 5 相对采集几率  $P$  的无量纲曲线

系数。因此,当 $q$ 及各级的 $d_{i50}$ 给定以后,由式(11)~(13)可求出各级孔径 $D_i$ 。

按上述方法设计的 HFS-1 采样器的性能曲线及参数示于图 6 上。

### 五、实验结果

用单分散气溶胶发生器产生的标准球形粒子对 HFS-1 采样器进行了采集几率实验。结果列于表 2 及图 6 上。理论与实验的颗粒直径相

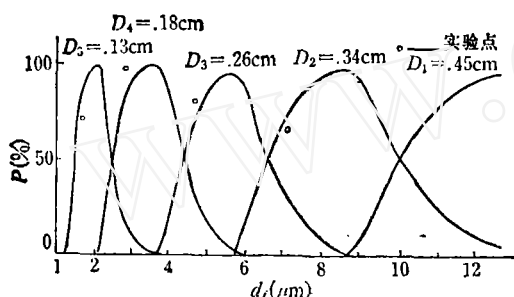


图 6  $Q = 0.5\text{m}^3/\text{min}$  时 HFS-1 采样器性能曲线

对误差为 1.78%—17.6%。造成误差的原因是多方面的,除理论计算忽略了某些次要因素,从而与实际情况有一定偏差外,实验标定条件及孔径加工精度问题也会引起采集粒径的误差。例如:实验中粒子尺寸的误差,采集量测量的误差,给定流量的精度问题等。除第四级外<sup>1)</sup>,误差值随级数增加而增加,这可能与孔加工精度有关,比如,第五级的孔径已是 0.13cm,十分小。实验中未考虑壁面损失,这也是造成误差的因素。

### 六、结论

本文从研究多孔采样器的流体力学原理出发,通过分析计算,指出当各射流孔距为 3—4 倍孔径时,多孔采样器的参数计算可类同于单孔采样器的计算方法。从而,继解决了单孔冲击式采样器参数计算方法后,现又解决了多孔冲

表 2 实验结果与理论计算的比较

级数	相对采集几率实验值 $P_{\text{实}}(\%)$	颗粒直径实验值 $d_{\text{实}}(\mu\text{m})$	颗粒直径理论值 $d_{\text{理}}(\mu\text{m})$	相对误差 $\frac{d_{\text{实}} - d_{\text{理}}}{d_{\text{理}}}\%$
1	52	9.92	10.1	1.78
2	65.3	7.04	6.9	2.03
3	80.3	4.64	4.9	5.30
4	97.8	2.76	3.35	17.60
5	70	1.66	1.55	7.10

击式采样器的参数设计问题。用本文方法设计的 HFS-1 采样器经实验标定后,证明理论设计合理,性能达到国家标准,通过了全国测试考核。

本工作得到吴承康教授和吕钧锋主任的支持和帮助。在标定实验中,得到中国医学预防中心卫生研究所的王炎生,中国科学院化学所的金顺子、夏永侠的协助。在此一并致以深切感谢。

### 参 考 文 献

- [1] May, K.R., *J. Sci. Instr.*, **22**, (1945), 187.
- [2] Fuchs, N. A., *Aerosol Impactor (A Review)*, in *Fundamentals of Aerosol Sciences* (ed. by D. T. Shaw), 1 (1978).
- [3] Marple, V. A. and Willeke, K. *Inertial Impactors: Theory, Design and Use*, in *Fine Particles* (ed. by B. Y. H. Liu), Academic Press Inc., New York (1976).
- [4] Willeke, K., et al., *New Inertial Particle Size Classification Techniques for Aerosol Sampling and Measurement*, in *Atmospheric Pollution 1980* (ed. by M. M. Benarie), Elsevier (1980).
- [5] Mercer, T. T., et al., *Ann. Occup. Hyg.*, **12**, (1969), 41.
- [6] 刘大有, 带有颗粒的圆射流冲击平板的计算, *力学学报*, **16**, 5(1984).
- [7] 刘大有, 大气飘尘冲击式分级采样器, *环境科学学报*, **3**, 4(1983).

(本文于 1985 年 10 月 31 日收到)

1) 第四级实验数据误差较大, 可能由于某种偶然因素造成, 有待进一步实验探讨。