

# 大气飘尘冲击式分级采样器

刘大有

(中国科学院力学研究所)

## 摘要

本文分析了冲击式分级采样器的工作原理,对采样器中各种几率给予了严格的定义,阐明了这些几率概念之间的差别和相互联系,提出了多级采样器的研究简化为单级采样器研究的方法.提供了考虑粘性效应及用二种阻力公式(斯托克斯公式和标准阻力公式)的数值计算的  $P(\theta, Q^*)$  曲线.对采样器工作特性曲线作了分析,指出各级主要采集粒径的范围大小和绝对收集几率的互相制约关系.提出采样器全面性能计算和设计方法.按本文提出的方法设计的LH-1型采样器,性能达到设计指标,已通过产品成果鉴定.

## 一、引言

大气飘尘的颗粒大小同其化学成分一样是危害人体健康的主要参量.因此,目前环境化学研究中,极需了解大气飘尘中不同尺寸颗粒的分布,进而研究其化学成分.所以采样器的研究是进行大气飘尘研究的前提.

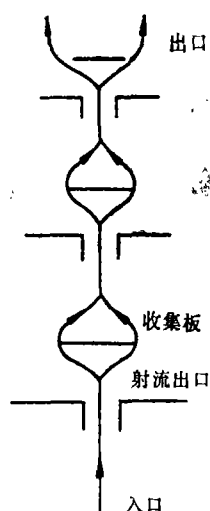
在各类粒子分级采集的采样器中,最常用的是根据流体力学的惯性碰撞原理设计的冲击式采样器.惯性碰撞理论,最早由 Sell 在1931年提出,以后逐渐发展<sup>[1]</sup>,至今已日趋完善<sup>[2,3]</sup>.但文献中讨论的多限于单级冲击器情况.关于采样器的设计,只提及按  $\theta_{50}^*$  的数据进行计算,且所依据的  $\theta_{50}$  理论值并不一致.

有关这类采样器的研究,国内尚未见有报道.近年来有些单位开始试制这类产品,但也都属仿制.

本文分析了这类采样器的工作原理,对采样器中各种几率给予了严格的定义,阐明了这些几率概念之间的差别和相互联系,提出多级采样器简化为单级采样器研究的方法.提供了考虑粘性效应及用二种阻力公式(斯托克斯公式和标准阻力公式)的数值计算的  $P(\theta, Q^*)$  曲线.对采样器工作的特性曲线作了分析,指出各级主要采集粒径的范围大小和绝对收集几率的互相制约关系.提出采样器全面性能计算和设计方法,即对采样器的各级收集几率和主要粒径收集范围作全面考虑,从而达到最佳设计方案.按本文提出的方法设计的LH-1型采样器,性能达到设计指标,于1982年12月通过产品成果鉴定\*\*.

\* 是相对收集几率为50%时的  $\theta$  值.

\*\* LH-1型采样器是由力学所和环化所协作研制成功的.



## 二、冲击式分级采样器原理

### 1. 工作原理

冲击式分级采样器是利用颗粒的惯性达到对颗粒大小分级采集的目的。当含尘气流由下往上流动时,气流通过圆孔形成射流冲向收集板。气流流动图案如图所示。气流速度不断改变大小和方向,气流中的较大颗粒由于惯性大,不易调整其运动方向以跟随气流,它们离开流线,与收集板撞击而被收集。随着圆孔孔径减小,射流速度加大,颗粒惯性效应也加大,越来越小的颗粒被迫离开流线被收集板收集,从而颗粒按它们的粒径大小(更确切地说是气动等效直径)被收集在不同的板上。

### 2. 收集几率

任何一种尺寸的颗粒并不只落在采样器的某一级上,而采样器的某一级也并不只收集单一尺寸的颗粒,所以这是一个对各种尺寸颗粒的收集几率问题。

#### (1) 相对收集率 $P_i(d)$

设前一级( $i-1$ 级)收集后留下的直径为  $d$  至  $d+\Delta d$  的颗粒总数  $A_{i-1}(d)\Delta d$  ( $A_{i-1}(d)$  为颗粒按其直径大小的分布函数),经本级( $i$ 级)收集后留下  $A_i(d)\Delta d$ ,则第  $i$  级收集粒径为  $d$  的颗粒的相对收集率为

$$P_i(d) = \frac{A_{i-1} - A_i}{A_{i-1}} \quad (1)$$

#### (2) 绝对收集率 $P_{0i}(d)$

令  $A_0(d)\Delta d$  为采样器入口处粒径为  $d$  至  $d+\Delta d$  的颗粒总数,则第  $i$  级收集到该种粒径的颗粒的绝对收集几率为

$$P_{0i}(d) = \frac{A_{i-1} - A_i}{A_0} \quad (2)$$

显然

$$P_{0i}(d) = \left\{ \prod_{n=1}^{i-1} (1 - P_n(d)) \right\} P_i \quad (3)$$

绝对收集几率表征采样器各级收集粒径为  $d$  的颗粒的能力,它是采样器性能的主要参数之一。

#### (3) 颗粒数几率密度 $P_{ni}(d)$

在某一级(例第  $i$  级)收集的全部颗粒中,粒径在  $d$  至  $d+\Delta d$  范围内的颗粒所占的比例为  $P_{ni}(d)\Delta d$ 。也即是

$$P_{ni}(d)\Delta d = \frac{\text{第 } i \text{ 级收集到粒径在 } (d, d+\Delta d) \text{ 之间的颗粒数}}{\text{第 } i \text{ 级收集到的颗粒总数}}$$

它同绝对收集率  $P_{0i}(d)$  相比,可以看出  $P_{ni}(d)$  是“纵向的”分布百分数,而  $P_{ni}(d)$  则是“横

向的”(同一级收集的粒径之间的)分布百分数。它们之间的关系是:

$$P_{ni}(d)\Delta d = C_{1i}P_{oi}(d)A_0(d)\Delta d \quad (4)$$

$C_{1i}$  是归一化因子, 它等于  $(\sum P_{oi}(d)A_0(d)\Delta d)^{-1}$ 。

当  $A_0(d)$  是常数时,  $P_{ni}$  与  $P_{oi}$  成正比, 即

$$P_{ni}(d) = C_{2i}P_{oi}(d) \quad (5)$$

所以, 当  $A_0(d) \approx$  常数时, 可以用  $P_{ni}(d)$  代替  $P_{oi}(d)$  作为衡量采样器性能的一个参数。由于测定  $P_{ni}(d)$  比较方便, 所以经常采用它标志采样器的性能。

(4) 质量几率密度  $P_{mi}(d)$

其定义为:

$$P_{mi}(d)\Delta d = \frac{\text{第 } i \text{ 级收集到的粒径在 } (d, d+\Delta d) \text{ 之间全部的质量}}{\text{第 } i \text{ 级收集到的全部颗粒质量}}$$

设  $B_0(d)\Delta d$  为进入采样器的粒径为  $d$  至  $d+\Delta d$  的全部颗粒的质量, 则

$$B_0(d)\Delta d = \frac{\pi}{6}d\rho_p A_0(d)\Delta d \quad (6)$$

$\rho_p$  为颗粒的材料密度, 则

$$P_{mi}(d)\Delta d = C_{3i}P_{oi}(d)B_0(d)\Delta d \quad (7)$$

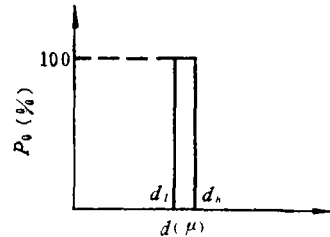
$C_{3i}$  是归一化因子, 当  $B_0(d) =$  常数时,

$$P_{mi}(d) = C_{4i}P_{oi}(d) \quad (8)$$

$C_{4i}$  为常数。因此当  $B_0(d)$  接近常数时, 可用  $P_{mi}(d)$  代替  $P_{oi}(d)$  来描述采样器性能。实际情况往往是  $B_0(d)$  比  $A_0(d)$  更接近常数。

### 3. 工作特性曲线

理想的采样器特性曲线如图所示。在粒径范围  $d_1-d_2$  之间的颗粒全部收集在第  $i$  级上, 而  $d_1-d_2$  以外的颗粒收集率为零。实际采样器特性曲线为图 1、图 2 所示。采样器的主要收集范围越窄, 在主要收集范围内平均(绝对)收集率  $\bar{P}_0$  越高, 则采样器的性能越优良。但是, 在一定条件下, 这两项指标是互相制约的(下面将讨论), 即要求  $d_1-d_2$  很狭, 这样  $d_1-d_2$  内的平均绝对收集率  $\bar{P}_0$  就不能很高。若要求  $\bar{P}_0$  高, 则  $d_1-d_2$  就不能窄。所以片面要求分割粒径很精细是没有意义的。



由工作特性曲线, 就可求得该采样器在某一流速下其主要粒径采集范围, 主要采集范围内的平均绝对收集几率, 采集粒径的下限, 采集几率(相对)为百分之百的粒径。这样, 对采样器性能有了全面了解。

## 三、采样器的性能计算和设计

采样器的理论研究就是研究绝对收集率与抽气速率, 颗粒性质, 结构尺寸等的关系, 从而提出采样器性能计算及设计的依据和方法。

### 1. 多级采样器的研究方法

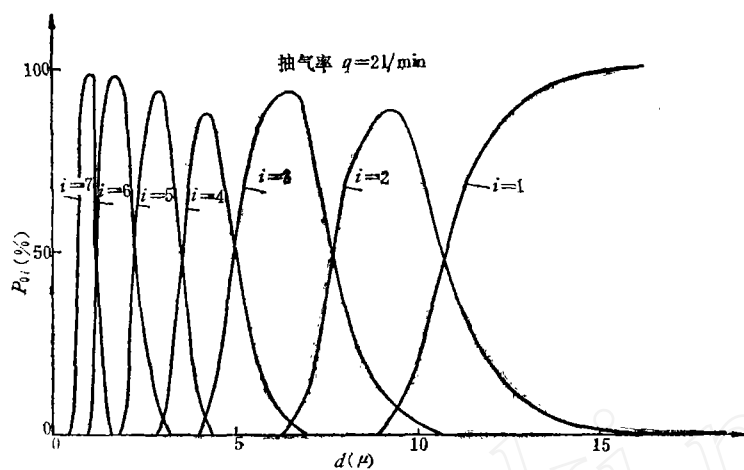


图 1 工作特性曲线

Fig. 1 Characteristic curves (flux=21/min)

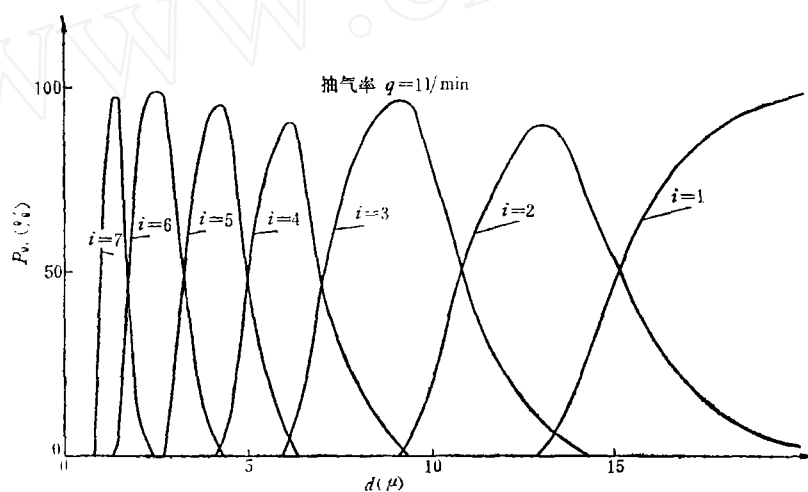


图 2 工作特性曲线

Fig. 2 Characteristic curve (flux=11/min)

多级采样器的各级绝对收集率与该级的几何尺寸以及前面各级的气流状态有关。而采样器的级数、各级的结构是各不相同的,因此研究多级采样器较为困难。

本文提出了相对收集率,它只与本级的来流和结构尺寸有关。已知相对收集率,由式(3)可求得绝对收集率。因此理论上多数采样器的研究可归结为单级采样器的研究。从现有的文献中,尚未见到有这方面的报道。

## 2. $P(\theta, \Omega^*)$ 曲线

文献(4)详细分析计算了收集几率,得到收集率(相对)是无量纲参数  $\theta$  及  $\Omega^*$  的函数。

基本假设是:

- (1) 流动为无粘性不可压的, 忽略重力影响.
- (2) 射流出口速度均匀分布.
- (3) 颗粒含量很少, 在射流出口处气流与颗粒均匀混合, 颗粒和气流的速度大小相等, 方向相同.
- (4) 收集板直径  $2S \gg D$ , 冲击距离  $h > 1.5D$ .  $D$  为射流出口直径.
- (5) 阻力系数公式为:  $C_0 = 24/Re$  (斯托克斯公式) 和  $C_D = \frac{24}{Re} (1 + \frac{1}{6} Re^{0.75})$  (标准阻力公式), 其中  $Re = \frac{\rho d}{\mu} V_{pp}$ .  $V_{pp}$  是颗粒相对于气体的速度绝对值,  $\rho$  是气体密度,  $d$  是粒径,  $\mu$  是气体动力粘性系数,  $Re$  是雷诺数.

考虑到粘性效应, 最后假设射流出口速度分布为  $V/V_{\max} = (1 - \frac{2x}{D})^{1/6}$ , 对计算结果进行修正. 其中  $x$  是射流的径向坐标. 得到的  $P(\theta, \Omega^*)$  曲线见图 3. 其中  $\theta = \omega \cdot S_t$

$$S_t = \frac{\tau_v V_{\infty}}{D} = \frac{\tau_v R}{18} \cdot \frac{\rho_p}{\rho} \cdot \frac{d^2}{D^2}$$

$$R = \frac{\rho D V_{\infty}}{\mu}$$

$$\omega = 1 + 2.46\lambda/d$$

$$\Omega = (R \frac{d}{D})^2 / S_t = 18 \frac{\rho}{\rho_p} R$$

$$\Omega^* = \Omega / \omega$$

$\tau_v$ ——颗粒的速度变化滞后于气流速度变化的弛豫时间.

$S_t$ ——弛豫时间  $\tau_v$  与流动特征时间  $D/V_{\infty}$  之比, 称为斯托克斯数.

$\lambda$ ——气体分子平均自由程, 标准状态下空气为  $0.066\mu$ ,  $\lambda/d$  为克努曾数.

$1/\omega$ ——稀薄气体效应对颗粒阻力公式的修正因子.

计算结果表明:

颗粒在平板上的撞击点主要集中在直径为  $2D$  的范围内. 当  $2S$  足够大时, 平板尺寸的影响可以忽略, 这时相对收集几率  $P$  只是  $\theta$  和  $\Omega^*$  的函数, 即  $P = P(\theta, \Omega^*)$ , 对于一定的  $\Omega^*$ ,  $P$  与  $\theta$  的依赖关系见图 3. 由图可见, 当  $\theta$  很大时,  $P \approx 100\%$ . 当  $\theta$  很小时,  $P \approx 0$ . 这说明每一级都有收集粒径的下限  $d_{\min}$  和近似百分之百收集的粒径  $d_{\max}$ . 小于  $d_{\min}$  的颗粒几乎完全不收集, 大于  $d_{\max}$  的颗粒则几乎完全被收集. 曲线上对应于  $P = 50\%$  的  $\theta$  值定义为  $\theta_{50}$ . 由计算结果可归纳为

$$\theta_{50} = 0.122 + 0.0017\sqrt{\Omega^*} - 0.00005\Omega^*$$

若用斯托克斯阻力公式, 则  $P$  与  $\Omega^*$  无关, 其结果正好重合于图 3 中  $\Omega^* = 0$  的曲线. 这时  $\theta_{50} = 0.122$ . 文献〔3〕给出了采用斯托克斯阻力公式计算得到的  $\theta_{50}$  值\*. 相应我们的计算条件, Marple 和 Wileke 提供的  $\theta_{50}$  值为  $0.1165 - 0.11$ . 他们的结果也表明, 当  $h > D$  时,  $h$  对  $\theta_{50}$  影响很小. 这些和我们计算结果和假设是一致的. 由于我们计算中采用了斯

\* 在文献〔3〕中, 相应于本文中  $\theta_{50}$  值是  $\frac{Stk_{50}}{2}$ .

托克斯阻力公式和标准阻力公式,因此还得到了 $\theta_{50}$ 和 $Q^*$ 的关系。应该指出,为了得到更精确的 $\theta$ 值,选用合适的阻力公式是很重要的。

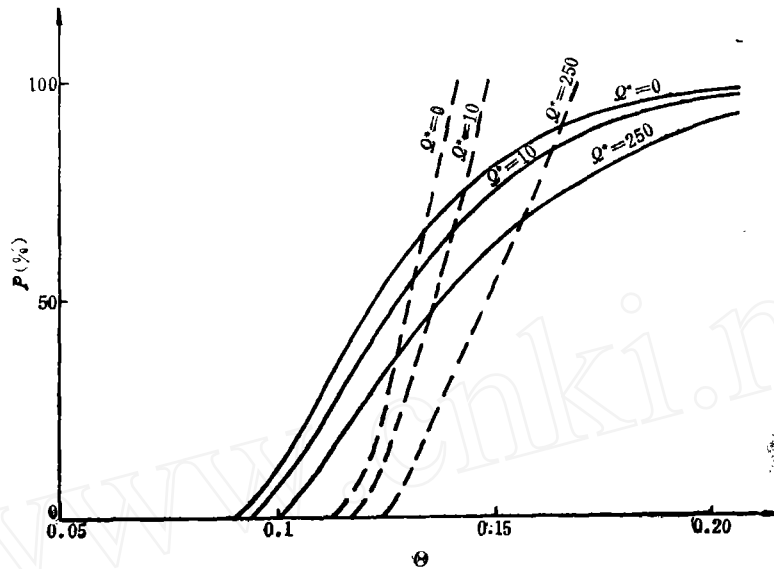


图3 相对收集几率 $P$ 与无量纲参数 $\theta, Q^*$ 关系曲线

---- 表示未考虑粘性修正  
—— 表示考虑粘性修正

Fig. 3 Relative collection probability  $P$  versus dimensionless parameters  $\theta$  and  $Q^*$

---- Without correction of viscosity  
—— With correction of viscosity

### 3. 性能计算

采样器的性能计算,也就是工作特性曲线的计算。若采样器工作在流量为 $q$ 状态下,该级孔径为 $D_i$ ,由前计算式可得

$$\theta_i = \frac{2}{9\pi} \cdot \frac{q\rho_p d_i^2}{\mu D_i^2} \omega \quad (9)$$

$$Q_i^* = \frac{72}{\pi} \cdot \frac{\rho_p^2}{\rho_p} \cdot \frac{q}{\mu D_i \omega} \quad (10)$$

其中取 $\rho_p = 1\text{g/cm}^3$

$$\mu = 0.1723 \times 10^{-3} \text{g/cm} \cdot \text{s}$$

$d_i, D_i$  单位为(cm),  $q$  为( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $\rho$  为( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

由(9), (10)式计算得 $\theta_i$ 和 $Q_i^*$ ,由图3查得 $P_i$ ,由式(3)求得 $P_{0i}$ 。由 $\rho_p d_i^2 = \text{常数}$ ,可折合 $d_i$ 于实际 $\rho_p$ 值情况。最后可得到如图1、图2的工作曲线。

### 4. 主要粒径采集范围和绝对收集几率的制约关系

图4可说明制约关系。标有1、2、3的各曲线(实线)为某一采样器工作特性曲线。若在第1级及第2级之间加一个孔径 $D_2 < D < D_1$ ,则这时采样器的工作特性曲线为标有I、

I、II、IV 的各曲线(虚线)。若取走第 2 级, 这时采样器的特性曲线为标 a、b 的曲线(锁线)。由这些曲线可见, 当加了一级, 即使主要收集粒径范围变窄, 这时  $\bar{P}_{0i}$  下降; 当取走一级, 即主要收集粒径范围加宽, 这时  $\bar{P}_{0i}$  上升。这是由于主要收集粒径范围缩小时, 即各级的射流出口孔径比趋近 1 时, 对某一粒径(例  $d=15\mu$ ) 颗粒, 由原来只有第 1、2 级收集变为第 I、II、III 级收集, 使  $P_{0i}$  下降。同样, 当主要收集粒径范围变宽时, 对某一粒径(例  $d=10\mu$ ) 颗粒, 由原来 2、3 级收集变为只有 b 级收集, 使  $P_{0i}$  上升。

因此, 设计者需合适选取主要收集粒径范围, 使分割点尽可能细, 每级收集范围尽可能狭, 又保证一定的平均绝对收集率。

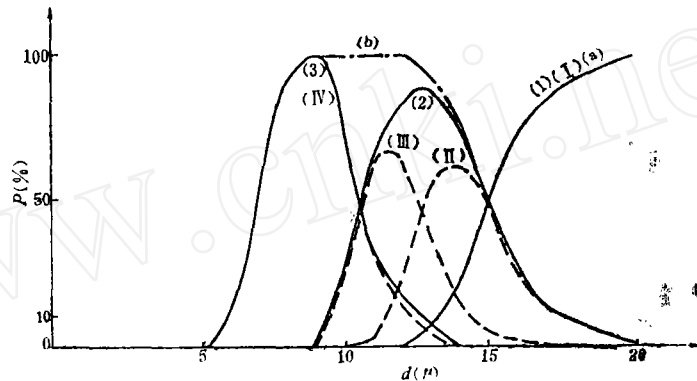


图 4 各种孔径组合下的采样器特性曲线

Fig. 4 Characteristic curves of samplers with various combination of different hole diameters

### 5. 设计方法

已知流量  $q$  及各级分割点粒径  $d_i$ , 设计步骤如下:

(1) 取  $Q^*=0$ , 由图 3, 查得  $\theta_{50}=0.122$ 。

(2) 取  $\rho_p=1\text{g/cm}^3$ ,  $d_i=\sqrt{\rho_{p\text{真}} d_{i\text{真}}}$ ,  $\rho_{p\text{真}}$  及  $d_{i\text{真}}$  为实际颗粒材料密度及分割粒径。

(3) 由(9)式得到

$$D_i = \left( \frac{2}{9\pi} \cdot \frac{q\rho_p}{\mu} \cdot \frac{d_i^3}{\theta_{50}} \omega \right)^{1/3} \quad (11)$$

(4) 由(10)式计算  $Q^*$ 。

(5) 由  $Q^*$  值查得  $\theta_{50}$  值。

(6) 由(11)式计算得到  $D_i$ 。

(7) 取冲击距离  $h_i=1.5D_i$ 。

(8) 取  $l_i \geq 3D_i$ 。

国外有些采样器以及国内某些仿制的采样器, 采用  $\theta_{50}=0.144$  设计。事实上  $\theta_{50}$  是  $Q^*$  的函数, 不是常数。此外, 只依据  $\theta_{50}$  值, 不能全面考虑采样器性能。本文提供了  $P(\theta, Q^*)$  曲线, 在设计中可以提供较佳方案。

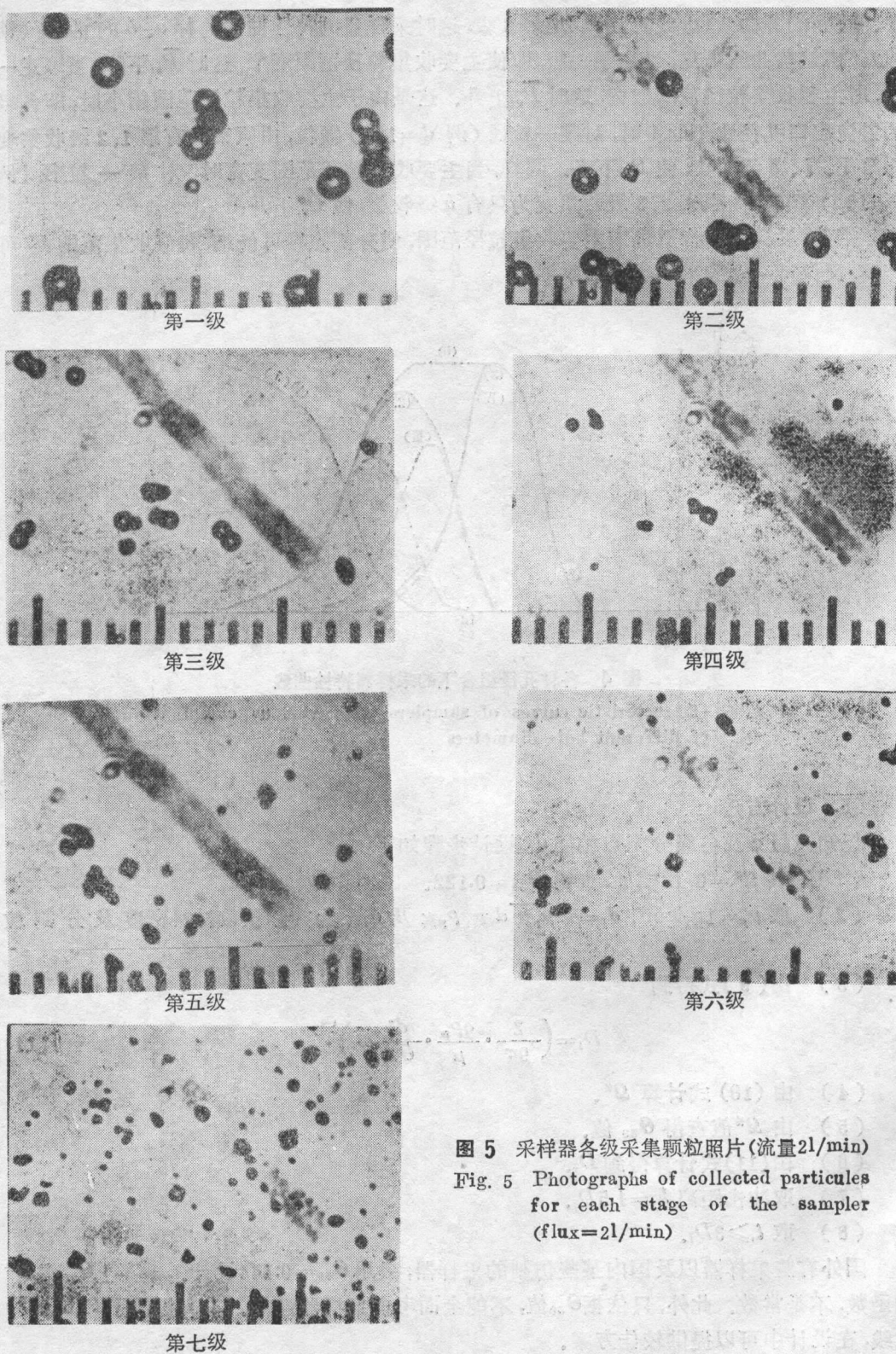


图5 采样器各级采集颗粒照片(流量2l/min)  
 Fig. 5 Photographs of collected particles  
 for each stage of the sampler  
 (flux=2l/min)



## 四、性能鉴定的方法和结果

采样器的性能需要由实验来鉴定, 理论也应由实验来验证. 为此设计加工了实验标定装置\*.

实验用标准球形粒子, 它只有一个特征尺寸. 飘尘不是球形, 但各种形状的颗粒, 在流体中的阻力有与球形相当的空气动力学等效直径. 因此, 采样器的某一级主要粒径收集范围若为 $d_i-d_h$ , 则它在大气采样中收集的飘尘其气动等效直径正是在 $d_i-d_h$ 之内.

实验用气体为不含自然大气尘埃的空气, 进入采样器时气体压强应等于大气气压, 飘尘含量应为小量, 在采样器入口处飘尘与气体应均匀混合. 气流量和飘尘含量可调. 通过改变 $q$ 及 $D$ 测得各种 $Q^*$ 下的 $P-\theta$ 关系.

对LH-1型采样器实验标定结果见图5\*\*. 照片中标尺每小格为 $5\mu$ . 表1是理论值. 将表中第三行的值与照片中颗粒相比较, 符合较好.

表1 LH-1型采样器性能参数(理论值)

Table 1 Performance parameters of the LH-1 sampler (theoretical)

| No (级数)                                   | 1     | 2        | 3       | 4       | 5       | 6        | 7         |
|-------------------------------------------|-------|----------|---------|---------|---------|----------|-----------|
| 理论主要粒径收集范围<br>( $\rho_p=1$ )( $\mu$ )     | >10.7 | 7.7—10.7 | 5.0—7.7 | 3.5—5.0 | 2.3—2.5 | 1.2—2.3  | 0.7—1.2   |
| 折合到 $\rho_p=2.4$ 时理论主要<br>收集粒径范围( $\mu$ ) | >7.0  | 5.0—7.0  | 3.2—5.0 | 2.3—3.2 | 1.5—2.3 | 0.78—1.5 | 0.48—0.78 |
| 主要粒径范围内平均绝对收<br>集几率(%)                    | —     | 73       | 77      | 73      | 76      | 78       | 74        |

## 五、结 论

本文引入了相对收集几率, 使多级采样器理论研究简化为单级采样器研究. 指出了采样器性能由其工作特性曲线描述, 有了特性曲线, 就可以描述采样器性能. 一个性能好的采样器应是主要收集粒径范围比较窄, 而平均绝对收集几率又比较高. 但是二者是互相制约的, 只追求分割粒径的精细是没有意义的. 采样器的设计不仅需要 $\theta_{50}$ 值, 且需要 $P(\theta, Q^*)$ 曲线. 有了 $P(\theta, Q^*)$ 曲线, 才能计算采样器特性曲线, 从而取得最佳设计方案. 根据本文提出的方法, 设计了LH-1型采样器, 实验证明达到了设计指标. 本文只讨论了单孔分级冲击式采样器, 但在一定条件下, 可用于多孔冲击式分级采样器.

本工作得到吴承康教授和卞荫贵教授的指导和帮助, 吕钧锋同志对工作给予大量支持, 在此一并致谢.

\* 环化所、力学所资料, “球形颗粒发生器和标定方法”.

\*\* 照片由环化所葛继荣同志提供.

## 参 考 文 献

- [1] Gorovin, M. N. et al., *Ind. Eng. Chem. Fund.*, 1, 264 (1962).  
[2] Licht, W., *Air Pollution Control Engineering*, Chap. 3, 5, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1980.  
[3] Marple, V. A. et al., *Inertial Impactors*, in Benjamin Y. H. Liu ed., *Fine Particles*, 411, Academia Press, Inc., New York San Francisco London, 1976.  
[4] 刘大有, 夹带颗粒的圆射流冲击平板的计算, 力学学报, 待发表.

1982年12月17日收到

## A MULTI-STAGE IMPACTOR SAMPLER FOR AIR-BORNE PARTICULATES

Liu Dayou

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

In this paper, the principle of the multi-stage impactor sampler was described and collection probability by means of a distribution function was defined. It must be pointed out that a multi-stage sampler can well be studied just like a single-stage one if the concept of relative collection probability is introduced. Through analysis of the characteristic curves of the samplers, this paper indicates that there are restraints between the main size range of collected particles and the absolute collection probability. Finally, performance calculation and optimum design of the sampler are given. An appraisal has been done for the LH-1 type sampler designed by using this method, expected performance has been met with success.