

用滤膜压力降法研究气溶胶发生器输出浓度的稳定性

刘蜀疆, 刘龙波, 吴艳敏, 王旭辉

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 先行研制的振筛进料流化床气溶胶发生器的稳定性能不够理想, 需要对其进行改进. 根据气溶胶在滤膜上沉积量与压力降的关系, 通过测量采样滤膜两端压力降, 对发生器发生浓度的稳定性进行了表征. 对流化床气溶胶发生器进料稳定性的影响因素进行了讨论, 研究了进气流量和进料斗中硅胶加入量对稳定性的影响. 测试结果表明, 进料斗中加入 1~3 层硅胶、进气流量 800~1000 L/h 时, 发生器发生浓度的稳定性最好.

关键词: 流化床气溶胶发生器; 滤膜; 压力降

中图分类号: TQ051.13

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2006)01-0019-04

1 前言

在气溶胶研究中, 如 PM₁₀(Inhalable Particulate Matter)切割器的研制、滤材沉积量与压力降关系的研究等, 经常需要有能产生固体气溶胶颗粒的发生器, 发生的气溶胶应具有较高的浓度和较宽的微米级粒度分布. 流化床气溶胶发生器是一种以固体粉末为气溶胶源的实用发生器, 国外已经有了商业产品^[1], 但其价格昂贵. 由于发生器构造简单, 也有研究者根据需要设计不同样式的此类发生器^[2]. 刘龙波等^[3]已对投料式(即无进料装置)流化床气溶胶发生器的性能进行了一定研究, 发现其发生浓度呈指数衰减, 使用范围较窄. 在此基础上设计了振筛进料流化床气溶胶发生器^[4](以下简称发生器), 虽能满足一般条件下的使用要求, 但其输出浓度的稳定性仍不够理想, 需要进一步改进.

气溶胶发生器的稳定性能是影响使用的重要因素. 发生器的稳定性能包括发生气溶胶的浓度和粒度分布两个方面, 对粒度分布进行的测试表明, 在一定操作条件下粒度分布比较稳定^[3,4]. 浓度稳定性测量要求测试仪器具有在线实时测量功能. 可用于微米级气溶胶浓度实时测量的仪器主要有激光粒度分析仪和空气动力学粒度分析仪(Aerodynamic Particle Sizer, APS). 但激光粒度仪的检测上限较小, 要使仪器的重叠误差不大于 3.5%, 气溶胶数必须低于 35 cm⁻³^[5], 因而, 在对高浓度气溶胶测量前必须先进行稀释. 而 APS 测量的粒度范围又较窄, 约为 0.5~20 μm^[1]. 在本实验条件下, 以上仪器均不能直接满足对粒度较宽、浓度较大的微米级气溶胶浓度进行测量的要求.

Sioutas 等^[6]提出了通过测量采样滤膜两端压力降实现气溶胶浓度实时测量的方法, 该方法对气溶胶的粒

度和浓度基本没有限制. 利用这种方法, 本工作对流化床气溶胶发生器发生浓度的稳定性能进行表征, 讨论了影响发生浓度稳定性的因素.

2 测试原理

研究^[7]表明, 气溶胶颗粒在滤膜上的沉积量大于 10 ng/cm² 时, 滤膜两端的压力降与沉积量成正比. Sioutas 等^[6]用核孔滤膜对气溶胶颗粒进行了采样分析, 得到沉积颗粒的压降变化值与气溶胶颗粒浓度满足如下关系:

$$d(\Delta p)/(C_m t) = 0.00032U/(D^3 d_p^{0.2}), \quad (1)$$

式中, $d(\Delta p)$ 为压力降变化值(kPa), C_m 为采样气溶胶浓度(μg/m³), t 为采样时间(s), U 为采样滤膜面流速(cm/s), D 为滤膜孔径(μm), d_p 为采样气溶胶颗粒粒径(μm).

为了表述方便, 定义压力降变化率为 k (kPa/min):

$$k = d(\Delta p)/t. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$k = 0.0182UC_m/(D^3 d_p^{0.2}). \quad (3)$$

由式(3)可知, 若保持 U , D 和 d_p 一定时, 则 C_m 与压降变化率 k 成正比. 在本实验条件下, 发生的气溶胶粒度分布基本相同, 流速相同时, 可以通过压降变化率 k 随时间的变化关系对发生浓度的稳定性进行表征.

3 实验

3.1 实验装置

发生器主要是指进料部分、流化床和静电中和器(中国原子能科学研究院)三部分安装为一体并固定在振筛机(杭州蓝天化验仪器厂)上, 如图 1 所示. 进料部分

从上至下依次为料斗盖、进料斗(Inlet diameter, I.D.=30 mm)和支撑网(网孔为 150 μm), 硅胶放在支撑网面上。

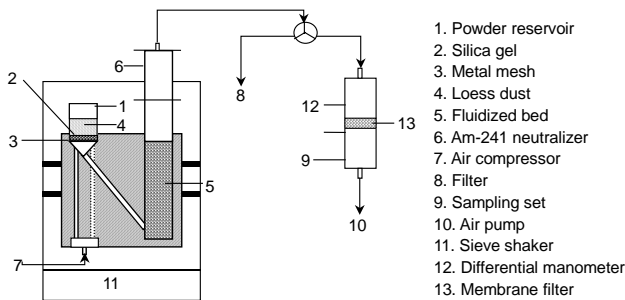


图1 发生器及测试装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the generator and sampling set

使用 GSBZ50021-91 标准黄土尘(Loess dust, 中冶集团建筑研究总院环保分院)作气溶胶源, 使用前在 150 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干. 流化床床料(以下简称床料)为 QFQSn-1 型球形锡青铜粉(Bronze powder, 河北衡水恒冠金属粉末有限公司), 床料、标准黄土尘和硅胶的物理参数见表 1. 实验前将标准黄土尘和床料分别加入进料斗 1 和流化床 5, 并将发生器分别与空压机 7 和采样装置 9 相连, 最后检查装置的气密性. 发生器工作时, 控制一定的进气流量, 粉体通过振筛机和气流作用使支撑网振动而从支撑网下料, 后随气流经导管(I.D. 8 mm)进入流化床(I.D. 30 mm)中分散成为气溶胶, 输出进入其他装置。

表 1 粉体和硅胶的物理性质

Table 1 The properties of the powders and silica gel^[8,9]

	Density (g/cm^3)	Size (μm)
Loess dust	2.6~2.7	0~60 ($d_{p50}=9\pm 1$)
Bronze powder	8.7~8.9	63~160
Silica gel	0.2~0.7	3.5~4.4

测量方法: 发生的气溶胶颗粒采集在 $\phi 39$ mm 的 0.65 μm 微孔滤膜上(上海市新亚净化器件厂), 滤膜两端压力降由采样装置中的 KYB14A 型压差计(量程 0~30 kPa, 西安康宇公司)测量, 间隔一定时间记录一次压力降值, 当压力降达到 30 kPa 时, 由三通进行切换, 更换新滤膜, 并称量采样前后的滤膜质量。

3.2 条件实验

为检验床料对发生浓度的影响, 首先进行床料空白实验. 在相同进气流量下, 考察振筛机和气流对发生浓度及其稳定性的影响. 为解决料斗中粉体在支撑网处易发生阻塞的问题, 考虑在料斗中加入一定量的硅胶颗粒, 并比较硅胶加入量对发生浓度及其稳定性的影响. 然后改变进气流量, 选择满足应用需要的适宜的发生条件。

4 结果与讨论

4.1 测量方法检验

根据式(2), 单位质量(Δm)气溶胶颗粒引起的压力降变化值可表示为

$$\Delta p / \Delta m = kt / (C_m t Q) = k / (C_m Q). \quad (4)$$

若在测试过程中保持 U , D 和 d_p 一定, 其中采样流量 Q 为定值, 则 $\Delta p / \Delta m$ 应为常数. 测试结果显示, 各次测量平均值为 58.44 kPa/g ($Q=1500$ L/h), 相对标准偏差为 13%, 与以下测试结果相比, 此值远低于浓度值的波动范围. 因此, 可以用 k 来表征发生浓度。

空白实验表明, 床料对气溶胶发生的贡献可忽略不计。

4.2 进料的稳定性

4.2.1 振动对下料的影响

发生器的进料是指进料斗中的粉体通过支撑网下料, 下料主要靠支撑网的振动和粉体自身重力作用实现. 导致振动有两个因素: 气流和振筛机, 因而有必要考察它们的影响. 在进气流量为 860 L/h、采样流速为 1000 L/h 条件下对滤膜两端压力降进行了测量, 结果如图 2 和 3 所示. 结果表明, 在气流作用下 k 值持续下降, 稳定性差(图 2). 但观察发现, 粉体在料斗中无明显团聚现象, 粉体有明显被气流振动的痕迹. 因此, 气流对粉体下料有作用, 但发生浓度的稳定性较差。

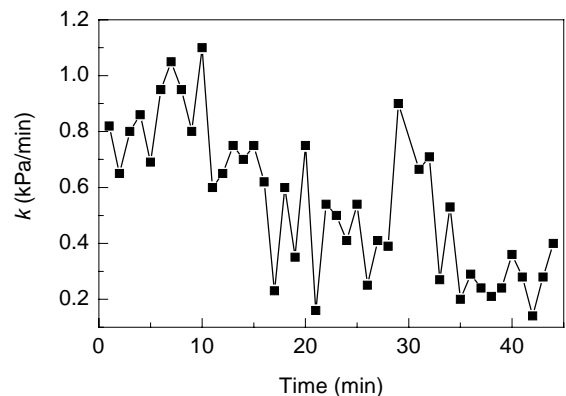


图2 气流作用下不同时刻的滤膜压力降变化率

Fig.2 The k versus sampling time with the effect of air

在相同气流和振动双重作用下, k 值先迅速减小, 到 25 min 后达到较稳定状态(图 3). 测试结束后观察料斗中的粉体性状, 发现粉体团聚严重, 并在支撑网面发生了严重阻塞, 这些因素均可能阻止粉体下料, 致使发生浓度减小, k 值降低. 因此, 振筛机的振动对发生浓度稳定性的提高程度有限, 且同时也加速了粉体的团

聚, 导致发生器在较长时间后才能达到稳定, 限制了发生器的有效利用.

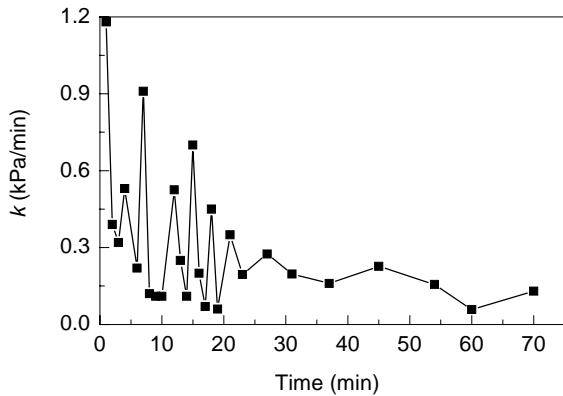


图 3 气流和振动下不同时刻的滤膜压力降变化率
Fig.3 The k versus sampling time on using sieve shaker and air

4.2.2 硅胶加入量对 k 及其稳定性的影响

在以往实验基础上, 本工作选定进气流量为 860 L/h 进行气溶胶发生, 采样流速改为 1500 L/h, 分别对硅胶质量为 0, 2.37, 5.78, 7.29 和 9.62 g, 即硅胶在进料斗中的堆积层数为 1~4 层时对发生气溶胶浓度及其稳定性的影响进行测试, 结果见图 4. 由图可知, 发生的气溶胶浓度 k 随着加入硅胶颗粒在进料斗中堆积层数的增加而逐渐减小; 而发生浓度的稳定性(用 k 的相对标准偏差 RSD 表示)随硅胶层数的增加先缓慢减小而后增加, 加入 1~3 层硅胶时其变化量均较小, 且明显优于不加硅胶的情况.

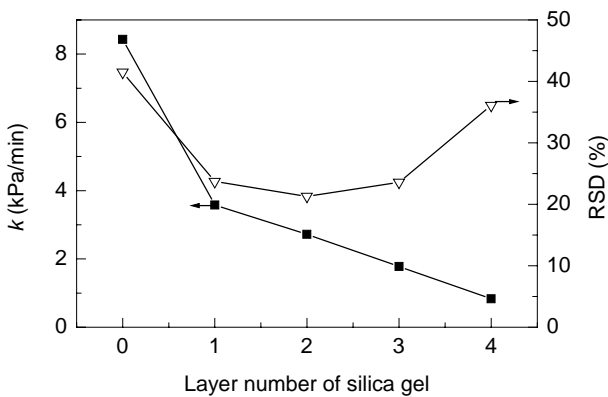


图 4 硅胶层数与气溶胶发生浓度及其稳定性的关系
Fig.4 The k and its RSD versus silica gel layers

观察发现, 硅胶在料斗底部支撑网面紧密排列, 此时粉体的下料方式变为先通过硅胶颗粒、后经过支撑网下料. 向料斗中加大硅胶的加入量, 相当于增加了堆积层数, 粉体下料需要通过的路径增长, 结果表明发生气溶胶的浓度减小, 但发生气溶胶浓度稳定性却基本不变.

因而, 硅胶的加入量对发生气溶胶浓度有一定的影响, 但其影响机制和程度还需进一步研究. 振动条件下因粉体的加速团聚和在支撑网面形成阻塞等原因, 导致发生浓度稳定性较差. 通过加入一定量硅胶可以使稳定性得到显著改善, 但发生浓度减小.

4.2.3 不同进气流量下的发生浓度及其稳定性

由以上讨论可知, 进气流量与支撑网振动作用直接影响粉体的下料. 不同硅胶量对 k 值有较大影响, 而其稳定性又基本一致. 根据发生器的工作要求, 流化床中气体流速应小于最小床料颗粒的沉降速度, 颗粒沉降速度满足以下关系:

$$V_{st} = \rho_p d_p^2 g / (18\mu), \quad (5)$$

式中, V_{st} 为颗粒沉降速度(m/s), ρ_p 为颗粒密度(kg/m^3), μ 为空气粘度系数(Pa·s). 由式(5)得到最大进气流量为 2238 L/h($d_p=63 \mu\text{m}$).

因此, 在加入单层硅胶量的条件下, 分别在进气流量为 400, 600, 800, 860 和 1000 L/h 及采样流量为 1500 L/h 条件下考察了 k 值及其稳定性, 结果如图 5 所示. 由图可知, 随着进气流量的增加, 发生气溶胶浓度逐渐增大, 且发生浓度的稳定性显著提高. 这是因为低流速下发生气溶胶的粒度分布是由流化床气流流速和粉体粒度二者共同决定的, 理论上只有当气流流速大于等于粉体中大颗粒的沉降速度时, 气溶胶的粒度才仅由粉体的粒度决定, 即对同一粉体气溶胶源, 进气流速只有在大于粉体最大颗粒沉降速度的条件下发生气溶胶的粒度分布才能稳定. 因此, 低流速下, 发生气溶胶的粒度同时又是流化床气流流速的函数, 根据式(3)和(4)可知, 随着流速的增加, 发生的气溶胶粒径逐渐增大, $\Delta p/\Delta m$ 值逐渐减小直至稳定. 由表 2 可知, 进气流量只有在大于 600 L/h 时, 发生气溶胶的粒度分布才基本一致.

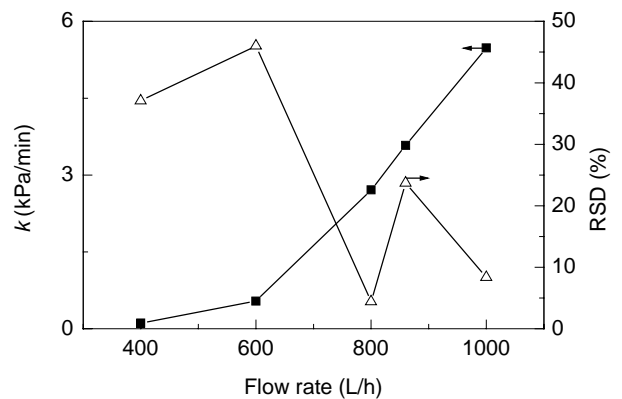


图 5 进气流量与气溶胶发生浓度及其稳定性的关系
Fig.5 The k and its RSD versus different flow rates

表2 不同进气流量下发生气溶胶的 $\Delta p/\Delta m$ 值

Flow rate (L/h)	400	600	800	860	1000
$\Delta p/\Delta m$ (kPa/g)	82.67	65.99	59.53	58.32	57.09

5 结论

(1) 在一定条件下, 通过测试滤膜两端的压力降实现对气溶胶浓度实时测量的方法, 可用于已知粒度分布相同的气溶胶颗粒的浓度稳定性表征. 实验表明, 此方法操作简便易行, 适用于精度要求不高的气溶胶浓度的测试, 具有一定的应用前景.

(2) 实验表明, 料斗中加入 1~3 层大颗粒硅胶, 进气流量为 800~1000 L/h 时发生浓度稳定性最佳.

(3) 自行研制的振筛进料流化床气溶胶发生器结构简单, 操作方便, 可用于一般的气溶胶研究工作.

参考文献:

- [1] Marple V A, Liu B Y H, Rubow K L. A Dust Generator for Laboratory Use [J]. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 1978, 39: 26-32.
- [2] Anthony J, Ronald L S, Timothy B O, et al. Design and Characterization of a Fluidized Bed Aerosol Generator: A Source for Dry, Submicrometer Aerosol [J]. Aerosol Sci. Technol., 2000, 32: 465-481.
- [3] 刘龙波, 王旭辉, 张自禄. 投料式流化床气溶胶发生器的研制及应用 [J]. 过程工程学报, 2002, 2(增刊): 341-344.
- [4] 刘龙波, 刘蜀疆, 刘红杰, 等. 振筛进料流化床气溶胶发生器性能的初步研究 [J]. 过程工程学报, 2004, 4(增刊): 876-878.
- [5] 许钟麟, 沈晋明, 陈长镛, 等. 粒子计数器采样气溶胶的误差 [J]. 中国粉体技术, 2000, 1(6): 15-19.
- [6] Sioutas C, Koutrakis P, Wang P Y, et al. Experimental Investigation of Pressure Drop with Particle Loading in Nuclepore Filters [J]. Aerosol Sci. Technol., 1999, 30(1): 71-83.
- [7] Kvestosia R S. Advances in Aerosol Filtration [M]. US: Lewis Publishers, 1997. 429-430.
- [8] [GB] GB13268-91, 大气试验粉尘标准样品 黄土尘 [S].
- [9] [JB] JB/T6649-93, 锡青铜球形粉末 [S].

The Measurement of Concentration Stability of the Fluidized Bed Aerosol Generator by Measuring the Pressure Drop of Sampling Membrane Filter

LIU Shu-jiang, LIU Long-bo, WU Yan-min, WANG Xu-hui

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: The fluidized bed aerosol generator, which can produce dry particles with a wide micron size distribution and high concentration, is an important instrument in aerosol research. The generator has been designed for our studies, such as the improvement of the PM₁₀ impactor and the character of aerosol collection, and the powder reservoir was appended to feed the powder into the fluidized bed continuously. But its stability of outlet aerosol concentration was not satisfied well in the past applications, and it was mainly affected by the stability of powder entrancing into the bed, so the feeding system of generator needed improving. Based on the relation between the collected mass of an aerosol and the pressure drop of sampling membrane filters, the stability was characterized by measuring the pressure drop in this work. By this method, the parameters affecting feeding system were discussed firstly, and then a method putting some silica gel into the powder reservoir in order to improve powder feeding system stability was put forward. In the tests, the number of silica gel layer was changed from 1 to 4, the flow rate was varied from 600 to 1000 L/h, and the stability of generator under these conditions was tested respectively. Finally, it can be concluded that the stability of this generator is below 30% with 1 to 3 silica gel layers in the powder reservoir and 800 to 1000 L/h flow rates. As a result, the generator can meet the aerosol research well.

Key words: fluidized bed aerosol generator; membrane filter; pressure drop