

颗粒物再悬浮和检测系统的性能指标

黄玉虎, 金大建, 毛华云, 朱萍, 李钢, 田刚

(北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要:系统地提出了颗粒物再悬浮和检测系统的性能指标, 指标至少应包括5方面: 颗粒物浓度稳定性、浓度调节平衡时间与连续运行时间、浓度可调范围、颗粒物采样均匀度、粒径分布的一致性. 根据干粉气动再分散方法和气溶胶力学理论, 集成了一款颗粒物再悬浮和检测系统, 并按照指标评估了该系统. 结果表明, 浓度可调范围为0.1~12000 mg/m³, 连续运行时间至少可达1~7 d, 浓度调节平衡时间≤1 min; 浓度稳定性较好, 各种运行状态对应的浓度相对标准偏差(RSD)的平均值≤10%; 各采样点采样均匀度好, RSD≤1.5%; 混合箱内颗粒物在空气动力学直径0~40 μm范围内的粒径分布与待测粉尘一致.

关键词:颗粒物; 再悬浮系统; 检测系统; 性能指标

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2009)05-0860-05

1 前言

颗粒物污染是北京乃至全国将来一段时间大气污染研究和控制的重点. 颗粒物研究一部分属于现场实验, 另一部分属于实验室基础性研究, 如无组织扬尘源颗粒^[1]和除尘器下灰的粒径分布与成分谱研究、光学颗粒物质量浓度和数量浓度监测仪的校准^[2]及颗粒物净化装置性能实验等. 以上实验室研究都需要一套颗粒物再悬浮和检测系统, 即在实验室稳定发生一定范围质量浓度和粒径分布的多分散粉尘颗粒物, 并进行检测^[3]. 其他学科领域同样需要此系统, 如制造业过程控制与职业卫生学^[4]、可吸入毒理学^[5]及环境健康与流行病学.

1950年以来, 为了开展各种颗粒物实验室基础性研究, 颗粒物再悬浮和检测系统在国内外得到了极大的发展, 研制了各种颗粒物再悬浮和检测系统^[1-15], 系统的性能指标和应用领域得到了改进和拓展. 但系统地提出再悬浮和检测系统性能指标未见报道, 导致无法全面评估颗粒物再悬浮和检测系统, 无法综合比较各种系统, 进而不能促进科研人员对此系统的改进和选择.

再悬浮和检测系统的关键子系统是颗粒物再悬浮系统, 颗粒物再悬浮过程包括2个步骤: 以恒定速度向颗粒物发生器连续定量投加粉尘及扩散粉尘形成颗粒物气流^[6]. 国外典型的再悬浮系统是Wright粉尘喂料系统^[7]和流化床系统^[2], 两者各有优缺点. 其中, Wright系统以一个恒定的速度磨蚀柱状压缩粉尘饼, 适宜长时间研究, 更适用于干燥、硬质材料粉尘, 且90%以上的颗粒粒径≤10 μm^[6]; 流化床系统能长时间稳定运转, 颗

粒粒径分布范围很广, 不受粉尘材质限制^[2], 但初始阶段需要几个小时才能获得稳定的输出浓度, 当改变粉尘喂料速率时, 约25 min~1 h才可达平衡^[6,9].

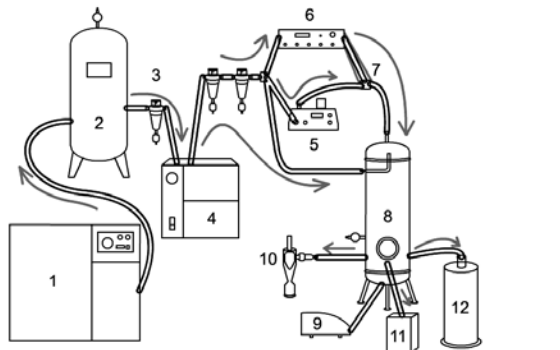
陈魁等^[10,11]研制的颗粒物再悬浮采样器不能连续定量发生颗粒物, 采样初期颗粒物浓度高、随时间逐渐衰减. 刘龙波等^[12]研制的投料式流化床气溶胶发生器也具有此性能. 刘龙波等^[13,14]研制的振筛进料流化床气溶胶发生器输出浓度平衡时间长, 稳定性不理想. 李永旺等^[15]研制的流化床气溶胶发生装置可以稳定输出高粒子数浓度、富含PM₁₀的颗粒物, 但没有评估输出质量浓度可调范围和平衡时间等参数.

通过总结国内外颗粒物再悬浮和检测系统的研制及评估经验, 本研究系统地提出了再悬浮和检测系统的性能指标, 尝试为改进和选择该系统提供建议. 为满足各颗粒物基础性研究工作的需要, 再悬浮和检测系统的性能指标至少应包括5方面: 颗粒物浓度稳定性^[9,13,14]、浓度调节平衡时间与连续运行时间^[6]、浓度可调范围^[9]、颗粒物采样均匀度^[10]及粒径分布的一致性^[9,13]. 此外, 根据干粉气动再分散方法^[6]和气溶胶力学理论^[6], 集成了一款颗粒物再悬浮和检测系统, 按照指标对其进行评估, 并与其他再悬浮和检测系统进行了比较.

2 系统流程和集成

图1是颗粒物再悬浮和检测系统流程图, 由颗粒物再悬浮系统和颗粒物检测系统组成. 待测粉尘在压缩空气的作用下从颗粒物发生器中发生, 经静电中和器消静电后进入均匀混合箱与压缩空气逆向对流, 实现颗粒物

再悬浮、浓度稀释和浓度场均匀化, 经气量平衡器的调压作用, 颗粒物检测系统与混合箱采样孔连接完成微正压等速采样检测。



- | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------|
| 1. Air compressor | 2. Gas container | 3. Filter | 4. Cold-drying machine |
| 5. Solid particle generator | 6. Electrostatic aerosol neutralizer | | |
| 7. Electrostatic mixing chamber | 8. Uniform mixing chamber | 9. Air balancer | |
| 10. PM ₁₀ cyclone sampler | 11. Aerosol monitor | 12. MOUDI | |

图 1 颗粒物再悬浮和检测系统流程图

Fig.1 Flow chart of particulate matter resuspension and measurement system

2.1 颗粒物再悬浮系统

颗粒物再悬浮系统由气源部分、颗粒物发生部分和再悬浮部分构成。还包括转子流量计(调节系统各部分的空气流量)和防静电软管(防止颗粒摩擦静电)等附件。

2.1.1 气源部分

气源部分包括无油空压机、储气罐、3级过滤器和冷冻干燥机。该部分为再悬浮和检测系统提供无油、洁净和干燥的压缩空气, 满足实验条件的压缩空气被四通接头分成3路, 第1路给颗粒物发生器, 第2路给静电中和器, 第3路给均匀混合箱。

2.1.2 颗粒物发生部分

颗粒物发生部分包括 TOPAS SAG-410/L 型颗粒物发生器、稀释桥(自制)及 TOPAS EAN-581 型静电中和器, 为再悬浮和检测系统提供稳定连续的颗粒物气流。

图 2 是颗粒物发生器分散装置示意图, 使用传动齿状皮带持续稳定喂料, 一个专用刮料装置可保证皮带齿间的填料均衡, 从而将储槽中粉尘量对颗粒物质量浓度的影响减到最小。喷嘴借助压缩空气将喂料皮带上的粉尘输出, 喷嘴口形成的剪切力将团聚粉尘微粒分散开, 从而形成颗粒物气流, 适用于粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的粉尘。稀释桥将颗粒物发生器产生的颗粒物气流分成2路, 第1路经节流阀进入静电中和器, 第2路经高效过滤后, 通过流量计和三通接头与第1路颗粒物合并进入静电中和器, 实现颗粒物低浓度调节和扩大浓度调节精度, 但不改变颗粒物粒径分布。静电中和器消除固体颗粒分散过程中机械摩擦产生的静电荷^[16]。

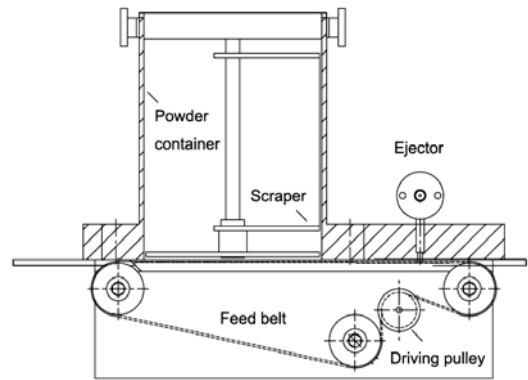


图 2 颗粒物发生器分散装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of dispersing unit of the solid particle generator

2.1.3 再悬浮部分

再悬浮部分包括均匀混合箱、采样孔与等速采样头、气量平衡器和压差表, 可保证再悬浮和检测系统内颗粒物浓度和粒径分布均匀一致, 并提供最佳检测条件。

从混合箱侧面引入的压缩空气将由混合箱顶部进入的颗粒物气流逆向吹起, 颗粒物在混合箱上部空间被均匀稀释, 然后随稀释空气向下移动, 最终从混合箱底部排出。在混合箱的中下部同一高度开4个采样孔, 相邻2个采样孔夹角为 90° , 等速采样头与混合箱内部采样管末端连接。气量平衡器将混合箱排放的含尘废气负压引出, 经过混合箱底部布气孔板的导流作用, 可防止排出的废气气流扰动。在混合箱采样孔上方安装压差表, 通过调节气量平衡器抽气量保证混合箱内采样区域接近大气压(50 Pa 微正压)^[9]。

2.2 颗粒物检测系统

为获得待测粉尘中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的滤膜样品, 选用美国 URG 公司的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 标准旋风式采样器(美国 EPA 联邦参考方法认可)作为检测系统, 采样流量为 16.7 L/min, 空气动力学直径(D_a)切割粒径分别为 10 和 2.5 μm 。为获得待测粉尘中 TSP(Total Suspended Particulates)各粒径段的滤膜样品, 选用美国 MSP 公司的微孔均匀沉积式碰撞采样器(MOUDI-110), 流量为 30 L/min, D_a 切割粒径分别为 0.056, 0.10, 0.18, 0.32, 0.56, 1.0, 1.8, 3.2, 5.6, 10 和 18 μm 。选用不同材质滤膜, 分析颗粒物中元素、离子、元素碳和有机碳等。

此外, 还有一些实时在线的颗粒物监测仪也可作为检测系统, 如德国 Palas 公司的白光气溶胶粒径谱仪(Welas[®]), 采样流量 5 L/min; 美国 TSI 公司的智能粉尘监测仪(DustTrak 8520), 采样流量 1.7 L/min。

2.3 实验粉尘

选用美国 PTI 公司的 ISO12103-1, A2 细测试粉尘, 即亚利桑那州道路测试尘(Arizona Road Dust, ARD)作

为实验粉尘,其颗粒粒径分布很宽(0.702~88.24 μm)、化学成分谱稳定,由该测试粉尘得出的实验结论可较全面地描述再悬浮和检测系统的特性。

3 性能指标

3.1 颗粒物浓度可调范围

调节颗粒物发生器喂料皮带的速度,可以大范围调节输出颗粒物质量浓度。根据颗粒物发生器的粉尘喂料体积流量(2~260 cm^3/h)、测试粉尘堆积密度(0.95 g/cm^3)及系统的空气设计用量(20.0 m^3/h),估算出该系统产生的颗粒物(TSP)浓度范围为 95~12000 mg/m^3 ,同时稀释

桥可降低颗粒物浓度下限,系统颗粒物浓度可调范围扩展为 0.1~12000 mg/m^3 ,能满足大部分实验的要求。

3.2 浓度调节平衡时间与连续运行时间

使用 DustTrak 8520 实时监测混合箱内 PM_{10} 浓度,最大量程范围为 0~100 mg/m^3 。通过调节颗粒物再悬浮系统运行状态(皮带转速和节流阀开度),输出不同的 PM_{10} 质量浓度,节流阀开度以稀释桥上流量计计量,设定采样间隔为 10 s,调节和监测了 12 种运行状态,每种状态持续 10~15 min。图 3 是 DustTrak 实时监测的 PM_{10} 浓度-调节平衡时间关系,浓度经历了由低到高、再由高到低的调节过程。

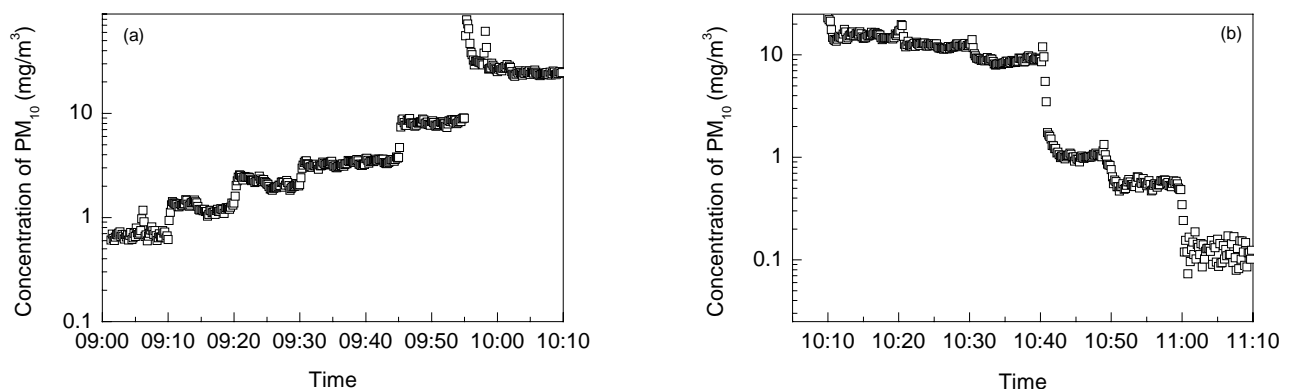


图3 颗粒物浓度-调节平衡时间关系

Fig.3 The relationship between concentration of PM_{10} and equilibrium time of concentration adjusting

由图 3 可看出,每调节一次运行状态, PM_{10} 浓度都可在短时间内达到平衡。其中,图 3(a)中前 5 次单纯提高皮带转速, PM_{10} 浓度都呈对数升高,30 s 后浓度达到平衡;第 6 次(9:55)提高节流阀开度, PM_{10} 浓度在 30 s 内由 8.98 mg/m^3 激增至 78.88 mg/m^3 ,这是由于节流阀突然增大的空气量将节流阀内积攒的定量粉尘瞬间吹出引起的,随后 PM_{10} 浓度又呈对数下降,5 min 后基本平衡。图 3(b)中第 8~10 次单纯限制节流阀开度, PM_{10} 浓度先升高后又呈对数下降,40 s 后浓度达到平衡。可以看出,再悬浮和检测系统的浓度调节平衡时间 ≤ 1 min,远小于流化床等系统的 25 min~1 h^[6,9,14],这是因为粉尘在该系统中的停留时间短。

颗粒物发生器的储槽对外界是开放的,可随时增加实验粉尘,另外为避免空压机疲劳工作而配备了 2 台供切换的空压机,则该系统的连续运行时间不受实验粉尘消耗和机器疲劳工作的影响,至少可达 1~7 d。

3.3 颗粒物浓度稳定性

对图 3 的时间序列浓度做稳定性分析,即对 12 种运行状态对应的浓度数据分别做相对标准偏差(Relative Standard Deviation, RSD)分析,参与分析的数据不包括

平衡时间内不稳定的浓度,稳定性分析结果见图 4。

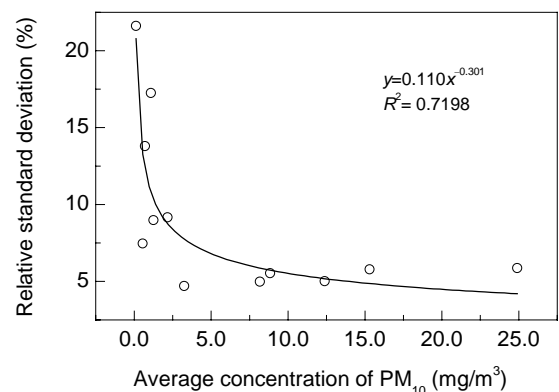


图4 均匀混合箱内 PM_{10} 浓度的稳定性

Fig.4 Stability of PM_{10} concentration in uniform mixing chamber

由图 4 可知,当均匀混合箱内 PM_{10} 平均浓度处于 0.1~25.0 mg/m^3 之间时,各状态下 PM_{10} 浓度(时间分辨率为 10 s)的 RSD 处于 5%~21% 之间,且随 PM_{10} 平均浓度升高呈幂函数下降,平均值为 9%,如果监测时间分辨率为 1 min,浓度稳定性将更好,该再悬浮和检测系

统的浓度稳定性优于刘龙波等^[13,14]设计的气溶胶发生器. 这种稳定性是由颗粒物发生器和均匀混合箱的特殊结构保证的, 传动皮带持续喂料和刮料装置可保证浓度稳定, 但齿状皮带无法避免浓度的波动性.

3.4 颗粒物采样均匀度

均匀混合箱内 4 个采样头垂直向上且中心均匀分布在水平同心圆上, 各采样位置间的采样均匀度是衡量再悬浮和检测系统的重要指标^[10]. 混合箱内径 350 mm, 箱内空气流量 330 L/min, 箱内气流速度(U_0)为 0.057 m/s. 设采样头气流速度为 U , 忽略非等速采样损失的 2 个条件是斯托克斯数(Stk) <0.01 和 $0.2U_0 < U < 5U_0$ ^[6]. 因此, 只要各采样头内径 >7 mm, 采样流量为 1.7, 5.0, 16.7 和 30 L/min, 采样器的非等速采样损失都可以忽略. U_0 满足各采样器对应的静风条件, 可按从静止空气采样来设计采样头内径^[6], 欲保证 $D_a \leq 20 \mu\text{m}$ 的颗粒物采样无损失,

上述采样器应分别匹配内径为 20, 20, 35 和 45 mm 的采样头. 此设计可以实现相同或不同流量的采样器同步等速采样, 也可实现标准采样器(PM_{10} 或 $PM_{2.5}$)和待校准仪器同步等速采样, 保证各采样位置的采样均匀度.

在混合箱内安装 4 个内径为 20 mm 的采样头, 使用 2 台 DustTrak 监测 4 个采样点的采样均匀度. 由于 2 台 DustTrak 本身存在差异, 因此用 2 台仪器监测 2 个采样点得到的差异是仪器差异和采样点差异的综合表现, 其中采样点差异就是采样均匀度. 基于此, 待箱内浓度稳定后(选择 3 mg/m^3 左右), 在 4 点中选择 2 点同时监测箱内 PM_{10} 浓度(每组监测 10 min), 得出 12 组监测值, 计算 2 台仪器监测值的比值, 假设仪器差异是常数, 可以通过分析 12 个比值的 RSD 考察采样均匀度. 实验数据见表 1, 结果表明 4 个采样点的 $RSD \leq 1.5\%$, 各采样点采样均匀度好, 优于 Chow 等^[1]和陈魁等^[10]的系统.

表 1 颗粒物采样均匀度实验数据
Table 1 Experimental data of sampling uniformity in mixing chamber

DustTrak8520-1 [#]		DustTrak8520-2 [#]		$1^{\#}PM_{10}/2^{\#}PM_{10}$
Sampling point	PM_{10} concentration (mg/m^3)	Sampling point	PM_{10} concentration (mg/m^3)	
A	3.423	D	3.283	1.04
D	4.292	A	4.197	1.02
B	4.932	D	4.807	1.03
D	3.259	B	3.090	1.05
C	3.308	D	3.200	1.03
D	3.066	C	2.992	1.02
C	3.382	B	3.251	1.04
B	2.890	C	2.861	1.01
A	3.309	B	3.174	1.04
B	4.455	A	4.413	1.01
A	3.146	C	3.062	1.03
C	3.201	A	3.189	1.00

3.5 粒径分布的一致性

欲使进入均匀混合箱的颗粒物在压缩空气中粒径分布保持一致, 不同粒径颗粒的最终沉降速度(U_f)必须小于等于混合箱内气流速度(U_0). 据气溶胶力学公式^[6], 标准状态下 $D_a=10, 20$ 和 $40 \mu\text{m}$ 颗粒的 U_f 分别为 0.003, 0.012 和 0.048 m/s. 已知 $U_0=0.057$ m/s, 因此, 可以预判 $D_a \leq 40 \mu\text{m}$ 的颗粒物随稀释空气在混合箱内向下移动过程中, 通过等速采样采集的颗粒物粒径分布将保持不变.

使用 Welas[®]监测不同状态下(皮带速度分别为 0.5%, 1%, 2% 和 5%)的颗粒物粒径分布, 每种运行状态持续 5 min, 为避开浓度调节平衡时间, 只监测后 4 min, 粒径量程范围 $0.6 \sim 40 \mu\text{m}$. 图 5 是颗粒物粒径分布一致性结果, 由图可知, 4 种状态下 ARD 颗粒物的数量累积粒径分布相关系数 $R^2 \geq 0.9998$, 质量累积粒径分布相关系数 $R^2 \geq 0.9985$. 另外选择北京安立路道路粉尘(ALR)作为对比($\leq 75 \mu\text{m}$), ALR 颗粒物的数量累积粒径分布、质量累积粒径分布与 ARD 的相关系数 R^2 分别为 0.9950 和 0.9893, ALD 与 ARD 的相关性不如 ARD 在不同运

行状态下的内部相关性. 结果表明, 均匀混合箱内颗粒物在空气动力学直径 $0 \sim 40 \mu\text{m}$ 范围内的粒径分布与待测粉尘保持一致, 同一种待测粉尘在系统各种运行状态下数量和质量累积粒径分布的相关系数 $R^2 \geq 0.9985$.

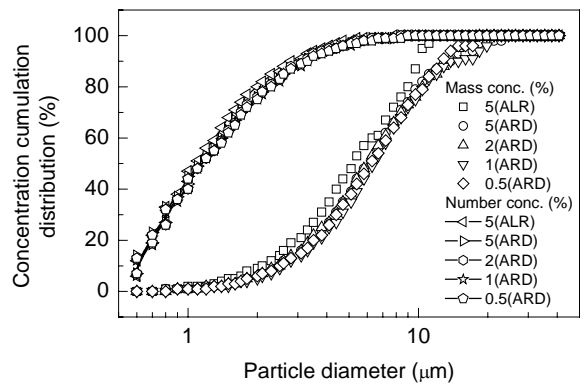


图 5 混合箱内颗粒物粒径分布一致性
Fig.5 Uniformity of particles size distributions in the mixing chamber

4 结论

(1) 系统地提出了再悬浮和检测系统的性能指标, 指标至少应包括5方面: 颗粒物浓度稳定性、连续运行时间与浓度调节平衡时间、浓度可调范围、颗粒物采样均匀度及粒径分布的一致性。

(2) 根据干粉气动再分散方法和气溶胶力学理论, 集成了一款颗粒物再悬浮和检测系统, 按指标对其进行评估, 结果表明, 浓度可调范围为 $0.1\sim 12000\text{ mg/m}^3$, 连续运行时间至少可达 $1\sim 7\text{ d}$, 浓度调节平衡时间 $\leq 1\text{ min}$, 浓度稳定性较好, 各种运行状态对应的浓度相对标准偏差(RSD)的平均值 $\leq 10\%$, 各采样点采样均匀度好, $\text{RSD}\leq 1.5\%$; 混合箱内颗粒物在空气动力学直径 $0\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的粒径分布与待测粉尘一致。

(3) 采用传动齿状喂料皮带、均匀混合箱逆流稀释及等速采样等措施, 可改进再悬浮和检测系统性能指标。

参考文献:

- [1] Chow J C, Watson J G, Houck J E. A Laboratory Resuspension Chamber to Measure Fugitive Dust Size Distributions and Chemical Compositions [J]. *Atmos. Environ.*, 1994, 28(21): 3463–3481.
- [2] Marple V A, Liu B Y H, Rubow K L. A Dust Generator for Laboratory Use [J]. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1978, 39(5): 26–32.
- [3] Gill T E, Zobeck T M, Stout J E. Technologies for Laboratory Generation of Dust from Geological Materials [J]. *J. Hazard. Mater.*, 2006, 132(1): 1–13.
- [4] Heitbrink W A, Todd W F, Cooper T C, et al. The Application of Dustiness Tests to the Prediction of Worker Dust Exposure [J]. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1990, 51(4): 217–223.
- [5] Shiotsuka R N, Kutzman R S, Firriolo J M. Use of Fluidizing Bed Aerosol Generators to Establish a Dust Mixture of Two Substances at a Fixed Ratio for Inhalation Toxicology Studies [J]. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1992, 53(8): 510–513.
- [6] Hinds W C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 46–48, 206–216, 438–445.
- [7] Wright B M. A New Dust-feed Mechanism [J]. *J. Sci. Instr.*, 1950, 27(1): 12–15.
- [8] Cowherd C, Grelinger M A. The Appropriateness of a Dustiness Test Chamber for Representation of Natural Suspension Phenomena [A]. Chow J C, Ono D M. *PM₁₀ Standards and Nontraditional Particulate Source Controls* [C]. Pittsburgh: Air & Waste Management Association Transactions, 1992, 22: 346–356.
- [9] Teague S V, Veranth J M, Aust A E. Dust Generator for Inhalation Studies with Limited Amounts of Archived Particulate Matter [J]. *Aerosol Sci. Technol.*, 2005, 39(2): 85–91.
- [10] 陈魁, 白志鹏, 朱坦, 等. 颗粒物再悬浮采样器采样均匀度研究 [J]. *过程工程学报*, 2004, 4(增刊): 865–867.
- [11] 陈魁, 白志鹏. 颗粒物再悬浮采样器研制与应用 [J]. *环境工程*, 2006, 24(5): 67–70.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘蜀疆, 刘龙波, 吴艳敏, 等. 用滤膜压力降法研究气溶胶发生器输出浓度的稳定性 [J]. *过程工程学报*, 2006, 6(1): 19–22.
- [15] 李永旺, 赵长遂, 吴新, 等. 新型流化床气溶胶发生装置及其特性 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(5): 742–745.
- [16] Forsyth B, Liu B Y H, Romay F J. Particle Charge Distribution Measurement for Commonly Generated Laboratory Aerosols [J]. *Aerosol Sci. Technol.*, 1998, 28(6): 489–501.

Performance Indices of Particulate Matter Resuspension and Measurement Systems

HUANG Yu-hu, JIN Da-jian, MAO Hua-yun, ZHU Ping, LI Gang, TIAN Gang

(Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: The performance indices of resuspension and measurement systems were systematically brought forward. The indices should include five aspects at least, the stability of particles concentration, equilibrium time of concentration adjusting and continuous running time, adjustable range of concentration, sampling uniformity of particles, and consistency of particles size distribution. A particulate matter resuspension and measurement system was designed according to the pneumatic redispersion of dry dust and mechanics theory of aerosol which is evaluated in terms of the indices. The evaluation result shows that the concentration of particles can be adjusted in the range of $0.1\sim 12000\text{ mg/m}^3$, the equilibrium time of concentration adjusting is less than 1 min , the continuous running time can reach $1\sim 7\text{ d}$ at least, the concentration is stable, and the average of concentration RSDs is less than 10% under various running states of system, the samples, from different sampling points within the uniform mixing chamber, get good uniformity, $\text{RSD}\leq 1.5\%$, the particles size distribution in uniform mixing chamber can keep consistency with testing dust in the range of $0\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ for aerodynamic diameter.

Key words: particulate matter; resuspension subsystem; measurement subsystem; performance indices