

# 南京市路面积尘的物理与化学特性实验研究

李传统, 贾荷花

(南京师范大学 动力工程学院, 南京 江苏 210042)

[摘要] 采集了南京市不同的路面积尘试样, 进行了试样的粒径与元素的相应实验分析, 得出了相应的粒径分布规律、元素组成和元素含量; 并对路面积尘的应用基低热值和分形维数进行了分析和计算, 其应用基低热值在 5 385. 0~ 7 366. 6 kJ/kg 之间, 分形维数为 2. 302~ 2. 541, 为路面积尘的直接能源化利用和卫生填埋提供了依据。

[关键词] 路面积尘, 粒径, 热值, 分形维数

[中图分类号] X 513 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009) 03-0028-05

## Experimental Investigation on Physical and Chemical Characteristics of Road Dust in Nanjing

Li Chuantong, Jia Hehua

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract** Different samples of road dust are taken in Nanjing city. Corresponding experiments on particle diameter and elemental components of these samples are performed to obtain distributions of particle diameters, elemental components and levels. Low-calorie-value of arrived basis and fractal dimension of road dust are computed and analyzed where low-calorie-value of arrived basis ranges from 5 385. 0 kJ/kg to 7 366. 6 kJ/kg and fractal dimension fluctuates between 2. 302 and 2. 541. This provides fundamental information for direct energy utilization and sanitary landfill of road dust.

**Key words** road dust; particle diameter; calorie value; fractal dimension

南京市自 2003 年评为国家卫生城市以来, 加大了市区路面积尘的清扫力度, 大量更新了街道清扫设备, 使市区路面清扫面积逐年增加, 清扫工艺有所改进。但现有的清扫工艺尚不能将路面上的积尘彻底扫净, 在行驶车辆的驱动下, 地面积尘形成了二次扬尘。研究表明<sup>[1]</sup>, 道路扬尘主要存在于粒径较大的颗粒中, 而机动车排放的颗粒物主要集中在粒径较小的颗粒物中。因此, 研究南京市路面积尘的物理与化学特性, 不仅对改进街道清扫工艺, 减少路面积尘的二次扬尘份额, 而且对确定清扫积尘数值模拟的边界条件, 提高数值模拟结果的可靠性均具有实际意义; 同时也可对清扫的路面积尘的进一步处理和处置工艺的选取提供依据。本文对南京市不同的路面积尘进行了采样和样品制备, 进行了相应的实验研究与分析, 以期获得有实用价值的结果。

## 1 实验部分

### 1.1 样品的采集与制备

为了保证采样的代表性与合理性, 分别对南京市主干街道路面(试样 1 和试样 2)和社区路面进行采样(试样 3 和试样 4)。主干街道上采集的尘样与社区路面采集的尘样是有区别的, 主干街道上的积尘经过行驶车辆的二次扬尘后, 一部分尘粒会进入大气飘尘, 一部分尘粒滞留在车辆表面, 还有一部分尘粒会重新沉降到主干街道地面; 而社区路面上的积尘则受行驶车辆二次扬尘的干扰相对较小。对汽车车身上的积尘(试样 5)和洗车场洗涤的尘粒(试样 6)进行采样, 二者可近似代表二次扬尘的路面积尘。此外还对市

收稿日期: 2009-06-15

基金项目: 齐齐哈尔市生活垃圾管理与处理(K11330CY7B)资助项目。

通讯联系人: 李传统, 教授, 研究方向: 可再生能源和固体废物管理与处理。E-mail: lict2003@ hotmail. com

区 10m 高度建筑物表面的积尘 (试样 7) 进行了采样, 可近似代表路面积尘扬尘后可能重新落到地面的路面积尘. 主干街道和社区路面积尘的采样方法分为两种, 第一种为采集全部尘样 (试样 1 和试样 3), 认为试样尘粒中包括所有粒度的路面积尘, 第二种为模拟路面清扫车辆的清扫方式进行采样 (试样 2 和试样 4), 认为所采样品尘粒中缺失少量未清扫干净的尘粒.

路面积尘的采样面积为  $2\text{m}^2$ , 采样时间为清晨清扫车辆未对路面清扫以前, 以保证所采试样具有代表性和可比性. 采样样品的数量满足相关实验仪器的实验试样要求, 并根据实验仪器的要求制备相应的实验样品, 以保证实验结果的正确性和可靠性.

## 1.2 实验内容

路面积尘的物理和化学性质都与粒径有关, 颗粒越细, 会吸附有害气体、重金属离子、致癌性很强的苯并芘有机物等<sup>[2]</sup>. 颗粒的大小和形状决定其最终进入人体的部位, 多环芳烃也主要富集在粒径较小的颗粒物中, 对环境和人体健康危害极大, 可致癌、致畸和致突变. 因此, 测定路面积尘的粒径分布是对路面积尘进行物理与化学性质进行研究的基础, 本文要对不同样品的粒径分布规律进行实验测定.

根据路面积尘的化学组成, 可以定性确定路面积尘的来源, 同时也是研究路面积尘的化学特性和选择进一步对其进行处理与处置工艺的依据, 本文需要对所采集的样品的主要成分进行定量分析.

路面积尘的热值高低决定了路面积尘是否具有单独进行资源化利用或高温热化学处理的依据, 因此本文应对路面积尘的低热值进行元素测定和热值计算.

路面积尘的分形维数<sup>[34]</sup>直接影响路面积尘在资源化利用或高温热化学处理过程中的传热与传质特性, 也会影响路面积尘填埋处理过程中的力学性能, 本文在实验分解结果的基础上, 需要对路面积尘的分形维数进行计算与分析.

## 1.3 实验仪器

路面积尘的粒径分析的实验仪器为英国马尔文 (Malvern) 公司生产的激光粒度分析仪, 型号为 Mastersizer 2000, 其测量范围为  $0.01 \sim 2000\ \mu\text{m}$ . 样品制备采用湿法分散技术, 用水作为分散剂, 使样品在高频震荡下充分分散, 然后再对样品进行粒径测试.

路面积尘的元素定性定量分析分别采用日本电子公司生产的 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜和美国 Noran 公司生产的 VANTAGE 型 X 射线能谱仪. 电镜分辨率达  $3.5\text{nm}$ , 放大倍数的范围为  $18 \sim 320000$  倍. 能谱仪元素分析范围为  $5B \sim 92U$ .

# 2 实验结果与讨论

## 2.1 路面积尘的粒径分布

所采集的 7 个试样用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行粒径测定, 将粒径范围  $0.02 \sim 2000\ \mu\text{m}$  的颗粒分为 100 个等级, 7 个试样的频率曲线如图 1 所示.

从图 1 中可以看出, 主干道路面积尘和汽车洗涤的路面积尘中因含有大粒径的颗粒, 粒径的分布呈现双峰态分布, 主干道路面积尘第一众数为  $25.17 \sim 31.69\ \mu\text{m}$ , 第二众数为  $893.36 \sim 1002.37\ \mu\text{m}$ ; 汽车洗涤的路面积尘的第一众数为  $28.25 \sim 31.69\ \mu\text{m}$ , 第二众数为  $399.05 \sim 447.74\ \mu\text{m}$ . 其余样试样均呈单峰态分布, 众数分别为  $28.25 \sim 31.69\ \mu\text{m}$ 、 $25.17 \sim 28.25\ \mu\text{m}$ 、 $56.36 \sim 63.24\ \mu\text{m}$  和  $31.69 \sim 35.56\ \mu\text{m}$ . 清扫的主干道路面积尘和社区路面积尘的面积平均粒径和体积平均粒径均小于  $80\ \mu\text{m}$ .

从图 1 中可以看出, 试样 1 和试样 2 虽然同为主干道路面积尘, 但二者的最大体积分数对应的粒径差别很大, 导致这种结果的主要原因是试样 1 的采集过程中将正常清扫过程中难以扫起来的大颗粒也采集到了试样中, 试样 2 则不包括正常清扫过程中难以扫起来的大颗粒.

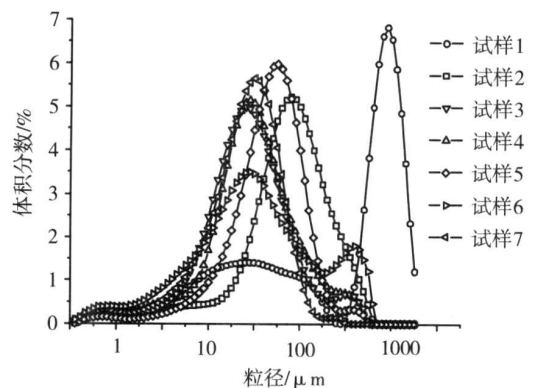


图 1 南京市区灰尘的频率曲线图

Fig.1 Frequency curve of road dust in Nanjing

根据不同粒径路面积尘对人体危害程度的不同,将粒径为 0.01~2 000 μm 的路面积尘分为 8 个区间,粒径范围分别为 0.01~2.5 μm、2.5~5 μm、5~10 μm、10~50 μm、50~100 μm、100~500 μm、500~920 μm、920~2 000 μm. 设路面积尘均为球形颗粒,1 m<sup>3</sup> 所含有 8 个等级的路面积尘数量如表 1 所示.

表 1 路面积尘中不同粒径颗粒物的数量

Table 1 Numbers of particulates with different particle diameter in road dust samples

粒径 / (μm)	试样						
	1	2	3	4	5	6	7
0.01~2.5	$2.20 \times 10^9$	$2.59 \times 10^9$	$2.98 \times 10^9$	$4.02 \times 10^9$	$1.86 \times 10^9$	$6.04 \times 10^9$	$4.19 \times 10^9$
2.5~5	$8.69 \times 10^7$	$7.13 \times 10^7$	$1.03 \times 10^8$	$1.13 \times 10^8$	$5.36 \times 10^7$	$1.92 \times 10^8$	$1.29 \times 10^8$
5~10	$2.45 \times 10^7$	$1.14 \times 10^7$	$3.73 \times 10^7$	$2.42 \times 10^7$	$1.58 \times 10^7$	$4.15 \times 10^7$	$3.72 \times 10^7$
10~50	$1.33 \times 10^6$	$1.52 \times 10^7$	$4.12 \times 10^6$	$3.93 \times 10^6$	$2.97 \times 10^6$	$2.95 \times 10^6$	$4.34 \times 10^4$
50~100	$3.26 \times 10^4$	$1.34 \times 10^5$	$7.38 \times 10^4$	$7.93 \times 10^4$	$1.51 \times 10^5$	$6.21 \times 10^4$	$8.58 \times 10^4$
100~500	$5.96 \times 10^2$	$2.86 \times 10^3$	$7.68 \times 10^2$	$9.91 \times 10^2$	$1.24 \times 10^3$	$1.46 \times 10^3$	$2.55 \times 10^2$
500~920	$1.38 \times 10^2$	7.31	2.35	1.81	1.39	$1.72 \times 10$	0
920~2000	$1.82 \times 10$	0	0	0	0	0	0

从表 1 可以看出,灰尘颗粒物中粒径为 0.01~2.5 μm 数量比粒径 2.5~5.0 μm 的颗粒越高 2 个数量级,粒径 2.5~5.0 μm 的颗粒与粒径 5~10 μm 的颗粒同为同一数量级. 粒径大于 10 μm 的颗粒数比粒径小于 10 μm 的颗粒数小 1~7 个数量级. 因此,降低路面积尘二次扬尘和提高路面清扫效果的过程中,主要是减少二次扬尘尘粒中 10 μm 以下尘粒的含量,以减轻路面积尘因二次扬尘对环境 and 人体健康所造成的潜在危害.

2.2 路面积尘的元素组成

路面积尘的主要来源有燃煤尘,建筑工地或各类装修产生的建筑尘,地面扬尘和冶炼尘以及汽车尾气的油烟尘等. 随着近年来城市机动车辆大量增加,机动车排放的氧化物和挥发性有机物也逐年增加,会导致部分地区出现光化学烟雾.

路面积尘所含成分十分复杂,含有上百种不同的有机物成分和无机物成分,本文主要着眼于路面积尘的高效清扫与资源化利用,实验中仅对路面积尘中的所含有的元素成分进行了分析,7 个试样主要的元素分析实验结果如图 2a~d 所示.

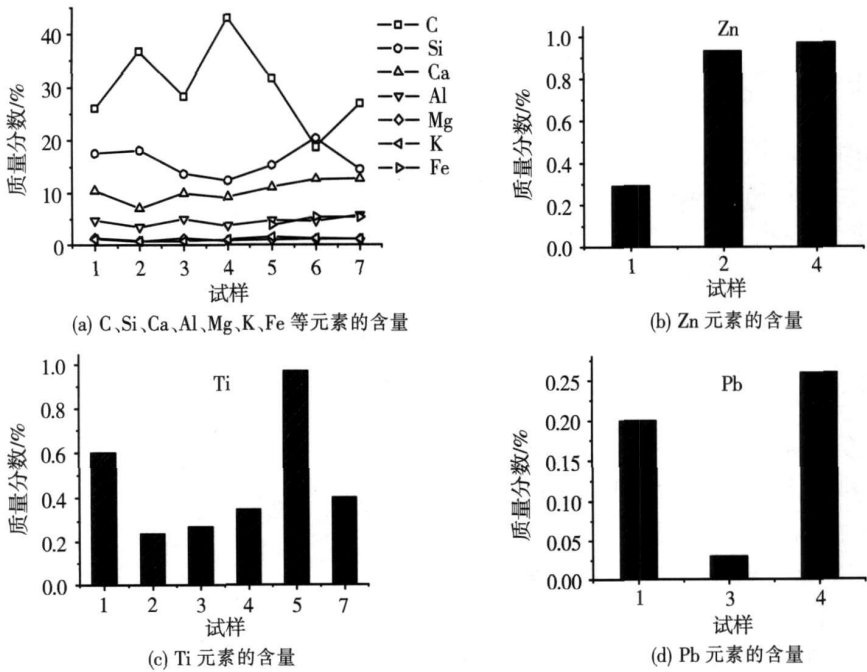


图 2 不同试样的元素含量

Fig.2 Elemental components of road dust samples

从图 2a~d 中可以看出,不同路面积尘试样的元素组成和元素含量是不同的,试样 1~试样 4 不含铁元素;试样 3 试样 5 试样 6 和试样 7 不含锌元素;试样 2 试样 5 试样 6 和试样 7 不含铅元素. 清扫的主干

道路面积尘和社区路面积尘积尘中的碳元素含量都很高, 超过了直接卫生填埋对碳含量的要求, 应根据其低热值的大小考虑是否直接进行能源化利用. 重金属铅和锌仅存于主干道和社区的路面积尘中, 对主干道和社区的路面积尘进行高效清扫, 可以减少铅和锌对环境和人体健康造成的危害. 不同试样中所含的硅元素的含量都较高, 所含钛都较少, 硅和钛的来源一般是建筑垃圾, 有效控制建筑垃圾的产生量和减少其在路面上的抛洒, 可以减少路面积尘中的硅和钛的含量.

2.3 路面积尘的收到基低热值

在路面积尘的能源化利用过程中, 工程上能够利用的路面积尘的热值为收到基低热值. 路面积尘的收到基低热值根据元素分析结果可用下式计算<sup>[5]</sup>,

$$Q_{arl} = 339C_{ar} + 103H_{ar} - 109(O_{ar} - S_{ar}) - 25M_{ar} \tag{1}$$

式中,  $Q_{ar}$  为路面积尘的收到基低热值 / (kJ/kg);  $C_{ar}$ ,  $H_{ar}$ ,  $O_{ar}$ ,  $S_{ar}$ ,  $M_{ar}$  分别为路面积尘中的碳、氢、氧、硫、水分的质量百分数值 %.

7种路面积尘试样元素分析中碳、氢、氧、硫的质量百分数值如表 2 所示.

表 2 路面积尘试样元素分析中部分元素质量百分数  
Table 2 Mass fraction of some elements in road dust samples

试样	C %	H %	O %	S %
1	36.80	—	31.57	—
2	26.06	—	37.13	—
3	43.13	—	27.77	—
4	28.36	—	39.99	—
5	31.68	—	28.34	0.33
6	26.98	—	30.49	0.38
7	18.77	—	34.73	0.20

路面清扫灰尘的收到基含水量的测定值为 30% 左右. 根据表 2 中路面积尘的试样的元素分析数据, 取路面清扫灰尘的收到基含水量为 30%, 用公式 (1) 可求得清扫路面积尘的收到基低热值在 5 385.0~7 366.6 kJ/kg 之间, 其收到基低热值达到了直接焚烧、热解或气化的能源化利用的收到基热值要求. 另外, 清扫的路面积尘的平均粒径很小, 不需要磨制就能满足粉炉对路面积尘作为燃料的粒度要求, 可直接送入粉炉进行燃烧, 不需要再进行制粉, 节省了焚烧系统中的制粉设备和制粉能耗.

2.4 路面积尘的分形维数

路面积尘的分形维数可由下式进行计算,

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left( \frac{R}{R_{max}} \right)^{3-D} \tag{2}$$

对式 (2) 取对数可得到

$$\lg \frac{V(r < R)}{V_T} = (3 - D) \lg \frac{R}{R_{max}} \tag{3}$$

上式中,  $D$  为颗粒的分形维数;  $V_T$  为颗粒的总体积  $\mu m^3$ ;  $V(r < R)$  粒径小于  $R$  的体积  $\mu m^3$ ;  $R$  为颗粒某分级范围内的平均直径  $\mu m$ ;  $R_{max}$  为颗粒群的最大直径  $\mu m$ .

利用式 (3) 求取路面积尘分形维数的方法, 是先确定每一分级区间的算术平均粒径值, 然后根据分级区间画出大于等于各区间算术平均粒径的累积体积, 最后求取拟合曲线的斜率  $3 - D$  的基础上确定其分形维数  $D$  的数值. 根据前述对 7 个试样粒径划分的 8 个区间, 求得路面积尘试样 1~ 试样 7 等 7 个试样的分形维数分别为: 2.492, 2.366, 2.409, 2.447, 2.301, 2.541 和 2.352. 分形维数较大反映了路面积尘中小颗粒所占的比例大. 路面积尘的分形维数值可为路面积尘的燃烧过程中的传热、传质数值模拟和填埋过程中的力学特性的研究提供依据.

3 结论

(1) 清扫的主干道路面积尘和社区路面积尘的面积平均粒径和体积平均粒径均小于 80  $\mu m$ , 不需要磨制就能满足粉炉对路面积尘进行焚烧时的粒度要求.

(2) 路面积尘中的碳含量很高, 其收到基低热值在 5 385.0~7 366.6 kJ/kg 之间, 可以作为焚烧炉的燃料进行能源化利用; 碳含量超过了直接卫生填埋对碳含量的要求, 不宜将路面积尘进行直接卫生填埋.

(3) 减少城市灰尘中 10  $\mu m$  以下颗粒物的含量, 可以减轻路面积尘的二次扬尘量. 提高主干道和社区的路面积尘的清扫效果, 可以减少路面积尘中重金属对环境和人体健康造成的危害. 有效控制建筑垃圾的

产生量和减少其在路面上的抛洒,可以减少路面积尘的产生量.

(4)路面积尘的分形维数在 2.302~2.541 之间,反映了路面积尘中小颗粒所占的比例大,为路面积尘的燃烧过程中的传热、传质数值模拟和填埋过程中的力学特性的研究提供了依据.

# [参考文献] (References)

- [1] 滕恩江, 胡伟, 吴国平, 等. 中国四城市空气中粗细颗粒物元素组成特征 [J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 238-241.  
Teng Enjiang Hu Wei Wu Guoping et al The composing characteristics of elements in coarse and fine particle in air of the four cities in China [J]. China Environmental Science, 1999, 19(3): 238-241. (in Chinese)
- [2] 牛红云, 王荟, 王格慧, 等. 南京大气溶胶中多环芳烃源识别及污染评价 [J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 543-548  
Niu Hongyun Wang Hui Wang Gehui et al Source identification and pollution evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric aerosols in Nanjing city [J]. China Environmental Science, 2005, 29(5): 543-548. (in Chinese)
- [3] 邵龙义, 沈蓉蓉, 杨书申, 等. 北京市  $PM_{10}$  粒度分布分形维数特征 [J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 407-411.  
Shao Longyi Shen Rongrong Yang Shushen et al Fractal dimensions of size distribution of airborne inhalable particulates ( $PM_{10}$ ) in Beijing [J]. J of China University of Mining and Technology, 2008, 37(3): 407-411. (in Chinese)
- [4] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用 [J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550  
Wang Guoliang Zhou Shenlu Zhao Qiguo Volume fractal dimension of soil particles and its application to land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545-550. (in Chinese)
- [5] 李传统, J D Herbell 等. 现代固体废物综合处理技术 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 19-29.  
Li Chuantong J D Herbell Modern Treatment Technologies of Solid Waste [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008: 19-29. (in Chinese)
- [6] Tang T T, Duong Byeong Kyu Lee Partitioning and mobility behavior of metals in road dusts from national-scale industrial areas in Korea [J]. Atmospheric Environment, 2009(43): 3502-3509
- [7] Zhang Minghui Wang Hao Concentrations and chemical forms of potentially toxic metals in road-deposited sediments from different zones of Hangzhou, China [J]. Environmental Sciences, 2009(21): 625-631
- [8] Michio Murakami Fumiyuki Nakajima Hiroaki Funumai The sorption of heavy metal species by sediments in soakaways receiving urban road runoff [J]. Chemosphere, 2008(70): 2099-2109
- [9] Han Lihui Zhuang Guoshun Cheng Shuyuan et al Characteristics of re-suspended road dust and its impact on the atmospheric environment in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2007(41): 7485-7499
- [10] Chiu Shin-Fu, Tsai Chuen-jinn Measurement of emission factor of road dust in a wind tunnel [J]. Powder Technology, 2001(118): 10-15

[责任编辑: 刘 健]