

治理技术

移动床颗粒层除尘器除尘效率研究*

张立平 林爱光 蒋维钧

(清华大学化学工程系, 北京 100084)

摘要 在分析颗粒层的过滤机理和影响移动床颗粒层除尘器除尘效率因素的基础上, 用多因子正交法在实验室装置上初步研究了过滤气速、颗粒的尺寸和种类、颗粒层厚度和颗粒层中的尘含量等因素对除尘效率的影响。并在工业装置上进行了试验验证。实验证明, 适宜的过滤气速为 0.2m/s, 床内颗粒直径取 1—2mm 较好, 床层厚度应等于或略大于 150mm。

关键词 过滤, 移动床, 除尘效率。

移动床颗粒层除尘是近几十年发展起来的高效干式除尘技术^[1-3]。移动床颗粒层除尘器适用于净化高温、尘含量高的烟气。

除尘效率是衡量除尘器质量的关键指标之一。影响除尘效率的因素很多^[4,5], 如过滤气速、颗粒的尺寸和种类、颗粒层厚度、颗粒层中的尘含量等。本文初步研究了以上各因素对移动床颗粒层除尘器除尘效率的影响。

1 颗粒层过滤机理

颗粒层捕集含尘气体中的粉尘, 使气体得以净化, 主要依靠接触凝聚作用、筛分作用和惯性碰撞作用, 也有一定的重力沉降作用。

接触凝聚作用是多种作用的总称, 由分子引力、静电引力和布朗运动等综合作用, 使粉尘和颗粒接触粘附, 同时使粉尘颗粒相互凝聚成较大颗粒, 被颗粒层截留。

惯性碰撞作用是当含尘气体流经颗粒层时, 粉尘在惯性作用下碰撞在颗粒上失去动能, 被捕集在颗粒层中。

筛分作用是当含尘气体流过颗粒层时, 若粉尘直径大于颗粒层中的孔隙时, 即被截留在颗粒层中。

重力沉降作用是指气体流经颗粒层中的孔隙时, 相当于流过许多小沉降室, 部分粉尘借助

重力沉积于颗粒层内。

对于上述各种作用, 文献^[6]中介绍了优势过滤机理相图, 说明各种捕集粉尘的效应在何种条件下占主导地位。

另外, 在粉尘被颗粒层捕集的同时, 颗粒层中粘附的部分粉尘也会向气流中飞扬。稳态时, 沉积与解积(再飞扬)会达到平衡。

2 实验流程简介

移动床颗粒层除尘器的冷热态实验分别在实验室装置及用于工业锅炉的除尘器上进行, 实验装置示意图参见图 1。含尘气体进入移动床除尘器, 气体中的粉尘被颗粒层截留而除去, 净化的气体直接排空。颗粒(滤料)以一定的速度自上而下流经除尘器中的过滤框与含尘气体错流接触, 不断捕集气体中的粉尘。含尘颗粒排出除尘器后进入提升器, 用气力将含尘颗粒自下向上输送到分离器。在此过程中, 粘附在颗粒层中的粉尘与颗粒脱离, 悬浮在气体中, 而后在分离器中实现与颗粒的分离。干净的颗粒进入除尘器循环使用, 由分离器排出的高浓度含尘气体进入小旋

* 国家“七五”科技攻关项目, 参加过本项工作的还有刘百新同学

1993 年 4 月 20 日收到修改稿

风分离器,除去粉尘。

除尘器除尘效率 η 的定义为:

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} \times 100\%$$

式中, c_0 为入口气体含尘浓度(g/m^3), c 为出口气体含尘浓度(g/m^3)。烟气含尘浓度用 SYC-I 型烟气测试仪测定。

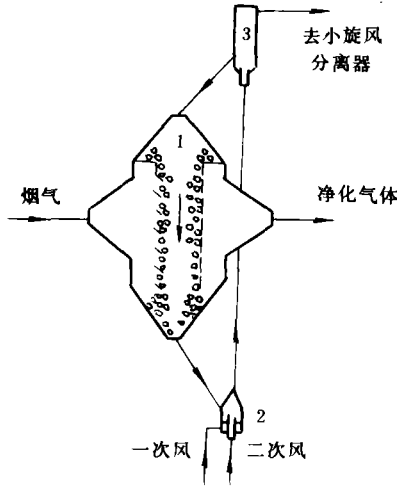


图 1 实验装置示意图

1. 移动床除尘器 2. 提升器 3. 分离器

3 影响除尘效率的因素分析及实验安排

在除尘器除尘过程中,过滤风速决定气体流经颗粒表面的速度,风速太高,会影响颗粒层捕集粉尘并会将床层中捕集的粉尘再度吹出,降低除尘效率。颗粒的几何尺寸也会影响除尘效率,颗粒的直径大,孔隙也大,对截留粉尘不利。颗粒床层的厚度是影响除尘效率的另一个因素,颗粒层厚则气体中粉尘被捕集的机率就高,但床层太厚则设备费、能耗高。粉尘在颗粒层中形成的滤饼层也会对除尘效率产生影响,粉尘含量高,颗粒层空隙率下降,有利于提高除尘效率。粉尘在颗粒床层中自上而下,自进风处至出风处都有一定的浓度分布,要准确地描述这种分布,需做大量的工作,作为一种近似方法,假设粉尘均匀地分布于颗粒层中,用颗粒层中的平均含尘浓度表示。但由于颗粒层中的含尘浓度受风速、砂速、气体进口含尘浓度、床层厚度的综合影响,故选气体进口浓度为实验因素。此外,颗粒层的流速

也是影响除尘效率的因素之一。根据上述分析,选定过滤风速、床层厚度、颗粒几何性质、气体进口含尘浓度和砂层移动速度这 5 个因素进行实验。

表 1 实验安排正交表

实验 序号	因 子					除尘 效率 η
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	1	98.3
2	1	1	2	2	2	98.6
3	1	1	3	3	3	90.5
4	1	2	1	1	3	97.8
5	1	2	2	2	1	99.6
6	1	2	3	3	2	95.6
7	1	3	1	2	3	97.8
8	1	3	2	3	1	99.4
9	1	3	3	1	2	97.8
10	2	1	1	3	1	97.4
11	2	1	2	1	2	97.8
12	2	1	3	2	3	96.9
13	2	2	1	2	2	98.6
14	2	2	2	3	3	94.2
15	2	2	3	1	1	98.4
16	2	3	1	3	2	93.3
17	2	3	2	1	3	99.1
18	2	3	3	2	1	98.6

表 2 实验矩阵

水平	A 砂速 (cm/min)	B 床厚 (mm)	C 颗粒 种类	D 气体进口浓 度(mg/m^3)	E 风速 (m/s)
1	4.48	180	a	9700	0.14
2	3.39	195	b	16000	0.23
3		160	c	3000	0.33

表 3 颗粒物性数据

颗粒种类 ¹⁾	平均粒径 d_p (mm)	空隙率 ϵ	堆积密度(kg/m^3)
a	2.06	0.429	1444
b	1.35	0.435	1425
c	2.45	0.319	1317

1) a、b 均为湖砂, c 为人工破碎的鹅卵石

选定经过改造的 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 正交表安排冷态实验, 参见表 1。表 1 中各因子的变量参见表 2 和表 3。实验所用的粉尘为粉煤灰, 其粒径分布参见表 4。分别测出各条件下的除尘效率 η , 填入表 1 中。

表 4 粉尘粒径分布

粒径(μm)	<12	12—20	20—32	32—45	45—63	63—105	105—134	>134
百分数(%)	3.26	1.78	5.6	9.53	22.55	24.51	19.13	13.64

由于高温下的烟气与粉尘和常温下的空气因素。与粉尘的理化性质有所不同,又在冷态实验的基础上,进行了工业炉除尘器热态运行试验。

4 实验结果与分析

对表 1 中的实验结果进行方差分析后可以看出,在本实验范围内,过滤风速的影响最为显著,其次为气体入口含尘浓度、颗粒物性、床层厚度,而颗粒层流速的影响较小。

直观分析与方差分析的结果是相符的。例如比较第 5 组与第 14 组数据,风速提高,除尘效率下降。此外,除尘效率较高的点,多出现在颗粒直径小、床层厚、风速低的实验组中。

4.1 风速对除尘效率的影响

实验采用 $d_p = 2.06\text{mm}$ 的湖砂,床层厚度为 180mm ,颗粒层移动速度为 4.48cm/min ,气体进口含尘浓度为 9.8g/m^3 ,实验结果参见图 2。由图 2 可见,除尘效率随过滤风速的增加而降低。说

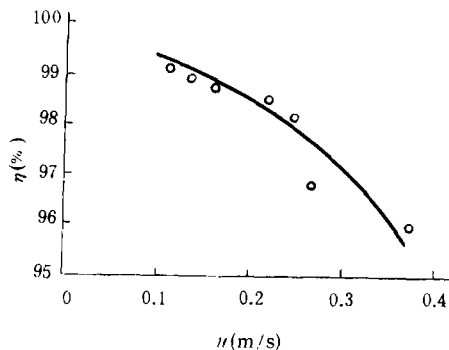


图 2 过滤风速与除尘效率的关系

明风速太高,粉尘来不及沉积在颗粒层中,增加了再飞扬的量。此外,进一步分析本组实验条件,颗粒层流速恒定,气体进口含尘浓度一定,随着风速提高,颗粒层中的含尘浓度也会增加,其关系参见表 5。砂层中的尘含量增加应该有利于捕集烟气中的粉尘,但在本组实验范围内,结论却相反,由此可见过滤风速是影响除尘效率的显著

表 5 不同风速下颗粒层中的尘含量

风速(m/s)	0.106	0.133	0.159	0.212	0.239	0.265	0.372
尘含量(kg 灰/ m^3 砂)	2.49	3.15	3.77	5.02	5.67	6.28	8.81

4.2 颗粒层中尘含量对除尘效率的影响

实验采用 $d_p = 2.06\text{mm}$ 的湖砂,床厚 180mm ,风速为 0.23m/s ,颗粒床层流速为 4.48cm/min ,实验结果参见图 3。从图中曲线的变化趋势可见,在适宜的风速范围内,颗粒层尘含量

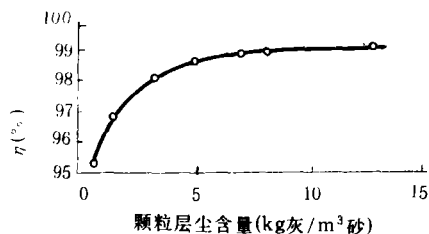


图 3 颗粒床层中的尘含量与除尘效率的关系

增加,有利于提高除尘效率。此时,在进风面附近的颗粒层中,存在粉尘浓集区,减小了颗粒层的孔隙率,使粉尘被捕集的机率提高。当砂层中尘含量增加到一定程度,除尘效率的提高幅度变小,说明砂层中尘含量不能太高,否则部分粉尘会被气流带出。

4.3 颗粒性质对除尘效率的影响

在冷态实验中发现,颗粒直径减小,有利于提高除尘效率。在实用型的工业装置上也进行了热态运行验证。用作沸腾锅炉的除尘器时,采用了 $d_p = 1\text{—}2\text{mm}$ 的湖砂,床层厚 150mm ,净化后的烟气尘含量低于 200mg/Nm^3 。用作工业窑炉的除尘器时,采用 $d_p = 2\text{—}4\text{mm}$ 的湖砂,床层厚 180mm ,连续运行中,有时排烟的尘含量高于 200mg/Nm^3 ,说明颗粒大小对除尘效率的影响比较大。

冷态实验还观察到,湖砂的除尘效率高于人工破碎的鹅卵石。因为湖砂形状比较规则,空隙分布均匀,而人工破碎的鹅卵石形态不规则,其中含有部分条形颗粒,造成空隙分布不均,局部床层空隙较大,使除尘效率下降。

4.4 不同厚度颗粒床层对除尘效率的影响

在冷态实验中,相同操作条件,床层增厚使除尘效率提高。但当床层厚度大于 150mm 时,床层增加,除尘效率的提高幅度减慢,故需综合考虑经济因素,全面考虑。

4.5 颗粒层流速对除尘效率的影响

在本实验范围内,颗粒层移动速度变化较小,对除尘效率的影响不明显。

4.6 工业热态试验

试验在沸腾工业炉除尘器上进行,床层厚 150mm,颗粒直径 $d_p = 1-2\text{mm}$,颗粒层移动速度 $2-14\text{cm/min}$,风速为 0.2m/s ,烟气进口浓度 7000mg/Nm^3 ,出口气体含尘量 $< 200\text{mg/m}^3$,除

尘器运行正常。试验表明,冷热态除尘效率的实验结果基本相符。

5 结 论

(1)影响移动床颗粒层除尘器除尘效率的显著因素是过滤风速,从实验结果看,取风速为 0.2m/s 左右较适宜。

(2)过滤床层中的颗粒直径取 $1-2\text{mm}$ 较好。

(3)综合考虑除尘效率及经济因素,过滤床层厚度应等于或略大于 150mm。

参考文献

- 1 张立平等. 现代化工. 1992,5:57
- 2 尾崎勲平等. 川崎技报, 1977, 64 号
- 3 真下孝等. 川崎重工业技报, 1979, 70 号
- 4 外山茂树等. 化学工科学论文集(日). 1987, 13(5):621
- 5 外山茂树等. 化学工科学论文集(日). 1989, 15(2):428
- 6 Emi H et al. . First Pacific Chem. Eng. Congress. Kyoto, Japan: 1972:10
- 7 城乡建设环境保护部. 农用污泥中污染物控制标准. GB4284-84, 1984
- 8 周毅等. 农业环境保护. 1986, 2:9
- 9 张学询等. 环境科学学报. 1988, 8(3):295
- 10 周鸿等. 环境科学学报. 1986, 6(1):60
- 11 顾淑华等. 环境科学学报. 1989, 9(1):27
- 12 林舜华等. 植物生态学与地植物丛刊. 1985, 9(2):85
- 13 夏增禄. 土壤环境容量及其应用. 北京:气象出版社, 1988:34
- 14 Page A L et al. Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land. Univ. of California, 1983:237
- 15 李应学等. 农业环境保护. 1988, 7(1):12
- 16 杨卓亚等. 土壤资源的特性和利用. 北京:北京农业大学出版社, 1992:105
- 17 Adriano D C. Trace Element in the Terrestrial Environment. New York: Springer-Verlag Inc, 1986:219
- 18 王宏康. 中国环境科学. 1983, 3(5):56
- 1 王宏康. 环境化学. 1991, 10(5):35
- 2 杨崇洁. 环境科学. 1989, 10(3):2
- 3 张学询等. 中国环境科学. 1988, 8(2):20
- 4 David Purves. 环境中的痕量元素污染. 西安:天则出版社, 1989:155, 207, 222
- 5 叶岱夫. 农村生态环境. 1986, 2:37
- 6 Webber J. Effect of Heavy Metal Pollution on Plants. London: Applied Science Publishers, 1981:159

(上接第 11 页)

(3)土壤对铅具有很大化学容量,但根据食品卫生学标准确定石灰性土壤铅的临界含量为 260mg/kg ,由此推算出污泥施肥时铅安全控制以 600mg/kg 为宜。

致谢 本校环保专业 87 级学生米长宏、袁红宇参加了实验室分析工作。

参考文献

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

Ra-226, K-40 in various waters are 0.12—8.94, 0.02—0.66 μ g/L and 6.0—98.1, 19.2—643 mBq/L, respectively. The geographical distribution of the environmental radiation levels is higher in the west-north mountain area and lower in the east-south plain of Beijing.

Key words: environmental radiation level, dose rate, Beijing.

Study of Treating Acid Cd-Containing Effluent with Expanded Graphite Fluidized Electrode. Zhang Hongbo et al. (Chemistry and Chemical Engineering Department, Hunan University Changsha); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 20—23

Acid Cd-containing effluent was treated with expanded graphite fluidized electrode effectively. It has advantages of fairly high current efficiency (40—50%), rapid removal of Cd²⁺ (40.7mg/min), fairly low energy consumption (6—10kWh/kg Cd) and so on. The concentration of cadmium ion in treated effluent can be decreased to below 10ppm. It does not comply with national effluent discharge standard, but it is still effective in the recovery of cadmium. Suitable conditions of treating acid Cd-containing effluent and methods for Cd-recovering were also investigated.

Key words: expanded graphite, fluidized electrode, Cd-containing effluent.

Pollution by Phosphorus in Farmland Drainage to the Taihu-Lake Water system. Zhang Shuiming et al. (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 24—29

By the phosphorus balance method in a closed system, this paper dealt with the discharge of phosphorus from agricultural non-point source in Taihu-Lake region in southern Jiangsu Province, and the measures to reduce this discharge. The results showed that the total discharge of phosphorus from the surface drainage of farmland in Taihu-Lake region was 440.4 t/a in a rainy year as 1987, and 299.9 t/a in a dry year as 1988.

Key words: farmland drainage, phosphorus discharge.

Study of the Genotoxicity and Concentration of Five Metals in Air-Borne Particles. Lei Xiufen et al. (Department of Epidemiology, Beijing Medical University, Beijing 100083); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 30—33

Samples of variously-sized total suspended particulates (TSP) in the air of one sampling site of Taiyuan are collected in winter. The concentration and the percentage of the particulates are measured, five metals including Pb, Mn, Cr, Ni and Cd in the

extracts from the samples are quantitatively analyzed by atomic absorption spectrometer, and the genotoxicity of the extracts are detected by the SOS chromotest and the mouse bone marrow cellular chromosome aberration assay in vivo. The results show that the mean concentration of TSP is 1.04mg/m³, much higher than the National Standard. The pollution of the smaller-sized particles is serious, as nearly half of the particles are less than 7.0 μ m in diameter. The concentration of Pb, Mn and Ni are high. Besides, the metals can be enriched strongly on the surface of the small particles. Having extracted by simulated lung fluid (SLF), it has been found that metals can dissolve partially into the SLF. The experiments show that both the extracts of acid and that of SLF of the smaller sized particles can induce SOS response and cause an increase in chromosomal aberrations. This indicates the existence of genotoxicants which may cause DNA damage or have clastogenic effects in the smaller-sized particles.

Key words: air-borne particles, genotoxicity, SOS chromotest, chromosome aberration assay.

Study on the Collection Efficiency of a Granules-moving Bed Dust Filter. Zhang Liping et al. (Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 34—37

Based on analysing the mechanism of filtration through a granule layer and the factors affecting the dust collection efficiency of a granule layer moving bed filter, an orthogonal multi-factor method was used in a laboratory apparatus to preliminarily study the effects of the factors such as the filtration velocity, the size and type of particles, the bed thickness, and the dust load of granule layer, on the dust collection efficiency. Then, a demonstration was made in an industrial pilot plant. The results showed that the suitable filtration velocity was 0.2m/s, the particle size in the moving bed was preferred in 1—2mm, and the bed thickness should be equal to or slightly more than 150mm.

Key words: dust collection efficiency, granular moving-bed, filter.

Anaerobic-Anoxic-Aerobic Process for Municipal Wastewater Treatment. Yang Xiushan et al. (Capital Normal University, Beijing, 100037); *Chin. J. Environ. Sci.*, 14(6), 1993, pp. 38—42

A pilot reactor of anaerobic-anoxic-aerobic process was operated to treat municipal wastewater. The results indicated that the process was able to remove 90% total COD, 89% TSS, 93% VSS, and the removal rates of nitrogen and phosphorus were 80% and 40%, respectively. In anoxic phase, the