

活性炭烟气深度净化过滤器的研究^{*}

李传统, K G Schmidt

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京; 德国 Duisburg 大学机械系, Duisburg)

[摘要] 研究了以褐煤制成的活性炭为吸收剂、烟煤制成的活性炭为催化剂的活性炭烟气深度净化过滤器对垃圾焚烧烟气中有毒、有害物质的吸附规律. 研究结果表明, 活性炭烟气净化过滤器可以有效地吸附垃圾焚烧烟气中的 SO₂、HCl、NO_x、PCDD/PCDF、重金属颗粒等有毒、有害物质, 过滤后的烟气中 SO₂ 最大排放浓度为 1.9 mg/Nm³, HCl 最大排放浓度为 0.85 mg/Nm³, NO_x 最大排放浓度为 112 mg/Nm³, CO 平均排放浓度 10 mg/Nm³、重金属 Hg 的最大浓度为 15.9 μg/Nm³、重金属 As、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb、Sn、V 的最大浓度为 243.7 μg/Nm³、最小为 92.6 μg/Nm³、Cd、Ti 的最大浓度为 16.9 μg/Nm³、PCDD/PCDF 的浓度小于 0.05 ng/Nm³, 使垃圾焚烧产生的烟气满足环保要求, 为活性炭净化过滤器在烟气深度净化中的实际提供了依据.

[关键词] 活性炭, 过滤器, 烟气净化

[中图分类号] X131; [文献标识码] B; [文章编号] 1672- 1292(2002) 02- 0051- 05

0 引言

活性炭对气体的吸附的机理已进行了大量研究. 随着对垃圾焚烧后烟气净化要求的不断提高, 对烟气中二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、二恶英/呋喃(PCDD/PCDF)、重金属颗粒等物质的含量有了更加严格的要求, 现有的洗气装置很难满足新的烟气排放技术要求. 因此, 研究高效的垃圾焚烧烟气的深度净化装置, 降低垃圾焚烧烟气中二氧化硫、氮氧化物、二恶英/呋喃、重金属颗粒的排放浓度, 具有实用价值. 用活性炭作为垃圾焚烧烟气的吸收剂, 主要是要研究活性炭对烟气中 SO₂、NO_x、HCl、PCDD/PCDF 和重金属颗粒的吸收规律, 并对活性炭烟气净化过滤器的运行条件进行研究, 以提高洗气效率、降低运行成本; 防止活性炭自燃, 提高烟气净化过滤器的安全性和可靠性.

1 活性炭对烟气的吸附原理

褐煤活性炭性对 SO₂ 的吸附

$$\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_2 \text{ 吸附} \tag{1}$$

$$2\text{SO}_{2\text{吸附}} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_{4\text{吸附}} \tag{2}$$

$$2\text{H}_2\text{SO}_{4\text{吸附}} + \text{CaO} \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} \tag{3}$$

NO_x 还原:

$$2\text{NO}_2 + 2\text{C} \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{N}_2 \tag{4}$$

$$2\text{NO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{NO} + \text{CO}_2 \tag{5}$$

$$4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \tag{6}$$

$$2\text{NO}_2 + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \tag{7}$$

不希望发生的副反应有:

^{*} 收稿日期: 2002- 08- 10.
作者简介: 李传统, 1954- , 工学博士, 南京师范大学动力工程学院教授, 主要从事能源与环境工程方面的教学与科研工作.

$$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_4$$

(8)

$$\text{NH}_4\text{HSO}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$$

(9)

$$(\text{NO})_{2(\text{吸附})} + \text{SO}_{2(\text{吸附})} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{SO}_{3(\text{吸附})}$$

(10)

上述公式中,下标“吸附”表示该物质处于被吸附状态.

2 活性炭烟气深度净化装置系统

活性炭烟气深度净化装置系统示意图如图 1 所示. 经过酸洗的烟气, 首先与 NH₃ 定量装置(1) 供给的 NH₃ 进行混合, 经过加热器(2) 进行加热, 以免烟气温度过低导致活性炭结块. 经加热的烟气进入活性炭过滤器(3), 在活性炭过滤器内层是由褐煤制成的作为吸收剂的活性炭, 外层是由烟煤制成的作为催化剂的活性炭. 烟气与褐煤制成的活性炭接触后, SO₂、NO_x、PCDD/ PCDF、重金属颗粒等被不断吸收, 褐煤制成的活性炭在吸收上述物质后, 其吸附能力不断下降, 该部分褐煤活性炭经过排料装置(4) 不断由活性炭烟气深度净化装置底部排出, 新的褐煤活性炭则由供料装置(5) 从活性炭烟气深度净化装置上部补入, 以保证活性炭烟气深度净化装置连续运行. 烟煤制成的活性炭起到催化作用, 以增活性炭的吸附能力, 失效后的烟煤制成的活性炭也由活性炭过滤器底部排出、上部补入.

经过活性炭烟气深度净化过滤器处理的烟气, 进入冷却器(6) 回收热量, 然后经烟囱(7) 排入大气.

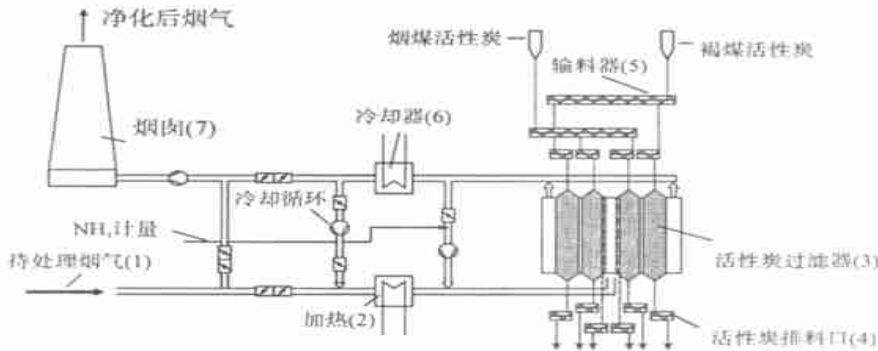


图 1 活性炭烟气深度净化过滤系统示意图

3 试验研究结果与分析

3.1 试验条件

活性炭烟气深度净化过滤器中所采用的褐煤活性炭的物性如表 1 所示.

作为催化剂的烟煤活性炭经过成型处理以后制成直径为 4 mm、长度为 4~ 12 mm 的圆柱体. 活性炭烟气过滤器的结构示意图如图 2 所示. 其处理烟气的能力为 60 000 Nm³/h, 与德国 Herte 垃圾处理厂中焚烧能力为 5 000 kg/h 的垃圾焚烧转炉相配套.

表 1 褐煤活性炭的物性参数

参数	数量	参数	数量
粒度/ mm	1. 5~ 5. 0	含水率/ %	0. 35~ 0. 50
堆积密度/(kg/ m ³)	500~ 530	灰份/ %	8~ 9
应用基低位热值/(kJ/ kg)	28 000~ 29 900	挥发份/ %	2. 0~ 3. 0
比表面积/(m ² / g)	290~ 300	固定炭/ %	86. 0~ 87. 5
空隙体积率/ %	45~ 50	含硫量/ %	0. 30~ 0. 45

试验中对 NH₃ 的加入量、烟气的流量、烟气在加热器(2) 和冷却器(6) 的进出口温度、活性炭烟气过

滤器中的褐煤活性炭温度(4点)、烟煤活性炭温度(4点)、活性炭的卸出速度和卸出量进行连续测量,将测量的数据输入到垃圾焚烧厂集控室的计算机系统,以便远程操作.试验中对卸出的活性炭进行定时采样,同时对经过处理排往烟囪的烟气进行定时采样,对所采集的试样进行就地或在实验室进行分析和化验.

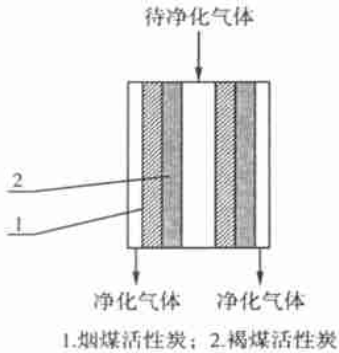


图2 活性炭烟气过滤器示意图

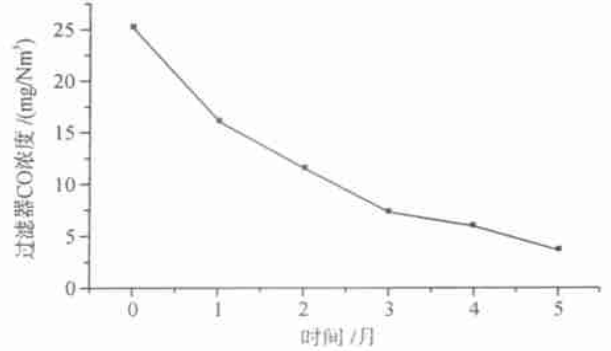


图3 CO 排放浓度随时间的变化

3.2 试验结果

CO 浓度在处理后的烟气的浓度随时间的变化规律如图 3 所示.

在活性炭烟气过滤器投放运行以后, CO 产生量随温度的变化规律如图 4 所示.

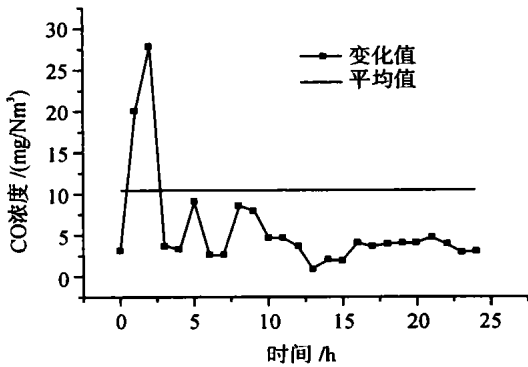


图4 CO 产生量随温度的变化规律

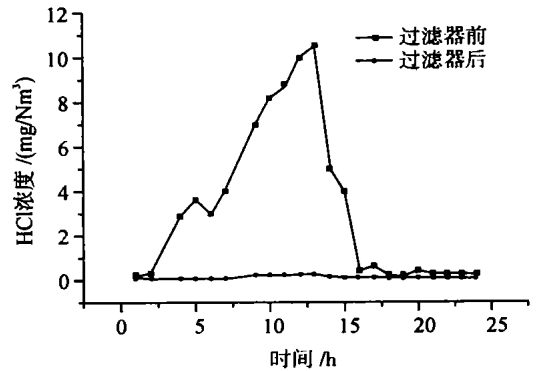
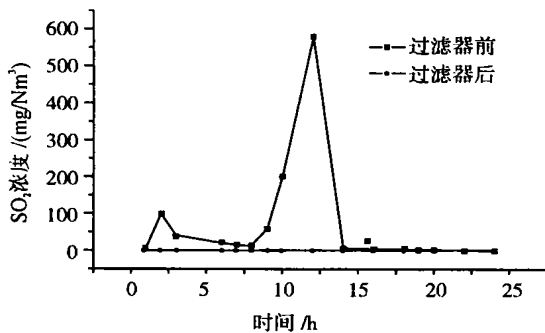
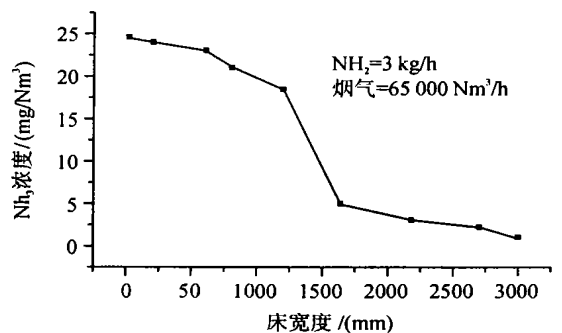


图5 HCl 排放浓度随过滤器入口 HCl 浓度的变化规律

图4的实验结果表明,当活性炭的温度超过 300°C 以后,活性炭产生的CO会急剧增加,为了保证活性炭烟气过滤器系统的运行安全,防止过滤器产的CO引起过滤器中的活性炭自燃,其运行温度应控制在 300°C 以内.

图6 SO_2 排放浓度随过滤器入口 SO_2 浓度的变化规律图7 NH_3 在活性炭烟气过滤器中的扩散规律

HCl 经过活性炭烟气过滤器后,其排放浓度随过滤器入口 HCl 浓度的变化规律如图 5 所示.

SO₂ 经过活性炭烟气过滤器后, 其排放浓度随过滤器入口 SO₂ 浓度的变化规律如图 6 所示.

NH₃ 经定量泵加入待处理的烟气, 与烟气混合以后进入活性炭过滤器, 它在活性炭烟气过滤器中的扩散规律如图 7 所示.

NO_x 经过活性炭烟气过滤器后, 其排放浓度随过滤器入口 NO_x 浓度的变化规律如图 8 所示.

重金属、PCDD/PCDF 经过活性炭过滤器处理以后, 其排放浓度结果如表 2 所示.

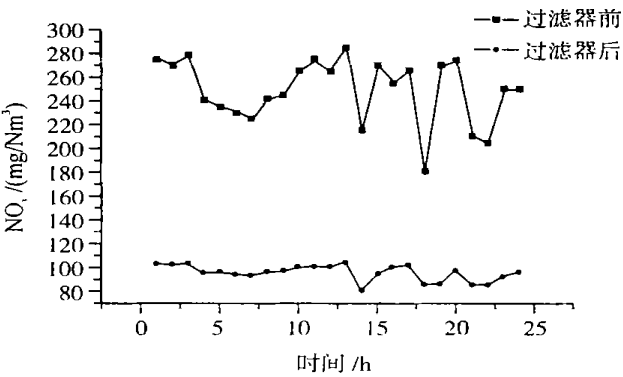


图 8 NO_x 排放浓度随过滤器入口 NO_x 浓度的变化规律

表 2 重金属、二恶英/ 呋喃排放浓度

参数	数值	参数	数值
Hg/ (μg/ Nm ³)	0. 3~ 15. 9	Pb/ (μg/ Nm ³)	16. 9~ 72. 2
As/ (μg/ Nm ³)	2. 8~ 23. 8	Sb/ (μg/ Nm ³)	1. 6~ 5. 3
Cr/ (μg/ Nm ³)	8. 4~ 58. 6	Sn/ (μg/ Nm ³)	8. 4~ 61. 5
Co/ (μg/ Nm ³)	< 2. 5~ 7. 9	V/ (μg/ Nm ³)	< 2. 5~ 26. 6
Cu/ (μg/ Nm ³)	14. 0~ 49. 9	Cd/ (μg/ Nm ³)	0. 8~ 11. 2
Mn/ (μg/ Nm ³)	8. 0~ 27. 0	Tl/ (μg/ Nm ³)	< 1. 4~ 13. 4
Ni/ (μg/ Nm ³)	5. 3~ 13. 4	PCDD/ PCDF(ng/ Nm ³)	< 0. 05

3.3 试验结果分析

如图 4 可以看出, 随着活性炭过滤器运行温度的提高, 活性炭生成 CO 的数量逐渐增加, 使活性炭过滤器的自燃可能性增加, 不利于活性炭烟气过滤器的安全运行; 当活性炭烟气过滤器的运行温度超过 300℃时, 活性炭产生的 CO 有导致活性炭烟气过滤器内部着火的危险. 图 5、图 6、图 8 的试验结果表明, 当 HCl、SO₂ 和 NO_x 的浓度在活性炭过滤器入口变化以后, 活性炭过滤器出口相应的 HCl、SO₂ 和 NO_x 排放浓度变化并不大. 当 HCl 的入口浓度从 0. 2 mg/ Nm³ 变化到 10. 4 mg/ Nm³ 时, 其活性炭过滤器出口排放浓度为 0. 15~ 0. 85 mg/ Nm³, 小于排放规定值 10 mg/ Nm³; 当 SO₂ 的入口浓度从 2 mg/ Nm³ 变化到 570 mg/ Nm³ 时, 其活性炭过滤器出口排放浓度为 1. 4~ 1. 9 mg/ Nm³, 小于排放规定值 50 mg/ Nm³; 当 NO_x 的入口浓度从 180 mg/ Nm³ 变化到 270 mg/ Nm³ 时, 其活性炭过滤器出口浓度为 80~ 112 mg/ Nm³, 小于排放规定值 200 mg/ Nm³; 这说明活性炭过滤器对其入口烟气中 HCl、SO₂、NO_x 浓度的变化具有很好的负荷适应性.

从表 2 中可以看出, 活性炭烟气过滤器对重金属、PCDD/PCDF 有较强的吸附能力, 经活性炭烟气过滤器处理的烟气, 试验中测得的 Hg 的最大浓度为 15. 9 μg/ Nm³, 小于规定值 50 μg/ Nm³; 试验中测得的重金属 As、Cr、Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb、Sn、V 总浓度最大为 243. 7 μg/ Nm³, 最小为 92. 6 μg/ Nm³, 均小于规定值 500 μg/ Nm³; 重金属 Cd、Tl 的总浓度最大为 16. 9 μg/ Nm³ 最小为 5. 7 μg/ Nm³, 均小于规定值 50 μg/ Nm³; 试验中测得 PCDD/PCDF 的总浓度小于 0. 05 ng/ Nm³, 低于规定值 0. 1 ng/ Nm³.

4 结论

研究结果表明, 活性炭烟气深度过滤系统能够有效地吸附烟气中的 HCl、SO₂、NO_x、重金属颗粒、二恶英/ 呋喃等有毒、有害物质, 降低垃圾焚烧烟气中有毒、有害物质的排放浓度, 使垃圾焚烧排放的烟气满足对环境的排放要求. 在活性炭烟气过滤器运行过程中, 应使其工作温度低于 300℃, 防止活性炭的

自燃,以确保系统运行的安全性.

[参考文献]

- [1] Sommers H, Peters W. Die Kinetik der Kohleoxidation bei massigen Temperaturen[J]. Chemie. – Tag. – Techn, 1994: 441~ 453.
- [2] Schmidt K G. Die Aktivkokstechnik als nachgeschaltete Rauchgasreinigungsmassnahme Messungen an einer Industriell- Verbrennungsanlage[J]. IUTA- Tagung Duisburg, 1991, 26, (9): 12~ 27.

Study on the Active Carbon Filter for Advanced Cleaning of Flue Gas

Li Chuantong

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

K G Schmidt

(Institute of Energy & Environmental Protection, Duisburg University, Germany)

Abstract: This paper deals with studies on how the flue gas filter, which uses the active carbon made from brown coal as sorbent and the active carbon made from bituminous coal as catalyst, adsorbs the poisonous and hazardous materials in garbage burning. The results indicate that active carbon filter for cleaning of flue gas can effectively adsorb SO_2 , HCl , NO_x , PCDD/PCDF, heavy metal particles and other harmful materials. After filtration, so the flue gas produced in garbage burning can meet the requirements of environmental protection, which lays the basis for the application of the active carbon filter for advanced cleaning of flue gas.

Key words: active carbon, filter, cleaning of flue gas

[责任编辑: 刘健]

(上接第 32 页)

[参考文献]

- [1] 林宗虎、徐通横. 实用锅炉手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [2] 北京有色冶金设计院. 余热锅炉设计与运行[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.

Design of Waste Heat Boiler Used for Regenerative Gas

Xu Shengrong

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: This paper gives a brief description of regenerative flue gas in FCCU. It discusses the design feature of waste heat boiler used for recovering heat energy of gas. That spiral-finned tube has a more compact structure. The deposition, low temperature corrosion and vibration in the heat-exchanger surface should be considered so as to guarantee that the boiler functions properly.

Key words: waste heat boiler, spiral-finned tube, low temperature corrosion, deposition

[责任编辑: 刘健]