

参 考 文 献

- [1] McCarty, P. L., *One hundred years of anaerobic treatment*, pp 3—22, The Second International Conference on Anaerobic Digestion, Travemünde, Germany, Sep. 1981.
- [2] Grin, R. R., Roersma, R. and Lettinga, G., *Anaerobic treatment of raw domestic sewage in UASB*

reactors at temperature from 9—20°C, Seminar/Workshop on Anaerobic Sewage Treatment, pp 27—28, University of Massachusetts, Amherst, U. S. A., 1985.

- [3] Bolle, W. L., *Proc. of the Eur. Symp. on Anaerobic Wastewater Treatment*, pp 97—99, Noordwijkerhout, Netherlands, 1983.

(收稿日期: 1989 年 11 月 28 日)

干法煤粉磁选脱硫的试验研究

吴士彬 张恒建 张思靖

(徐州市环境保护科学研究所)

摘要 本工作首次在国内完成了干法煤粉磁选脱硫的试验,探讨了脱硫机理,简述了磁法脱硫的工艺及高梯度磁分离器(HGMS)装置。试验结果表明:最佳梯度磁场强度为 0.65—0.75T,最佳煤粉颗粒度在 100 目—120 目,脱硫率最高达 70% 左右,费用估计为 7.5 元/t 煤左右。

关键词: 干法煤粉磁选脱硫;磁场强度;煤粉颗粒度。

我国煤产量的四分之一(约 2.5 亿吨煤)用于电厂发电,每年向大气中排放的 SO₂ 数量惊人。目前已有许多锅炉烟气脱硫方法有干法、湿法、炉内喷钙等等。然而这些工艺方法多属于烟气污染的尾端治理,设备庞大,投资高,建造周期长,很难实现综合利用。能否在煤进入锅炉燃烧之前进行脱硫处理,即炉前处理,干煤粉磁法脱硫即能达到这个目的。因此进入 80 年代之后磁法脱硫已成为先进国家环保与动力部门重点科研课题之一,为此我们受江苏省环保局的委托,从 1987 年到 1988 年在国内首次开展了干法煤粉磁选脱硫的试验研究,并于 1989 年 4 月通过了省级鉴定,当前我们正积极配合电厂做原型实用试验。

一、干法煤粉磁选脱硫的机理和试验装置

煤是一种成分复杂的有机与无机的混合物,其中 C, O, H, H₂O 为主要成分,此外,烟煤中都含有一定量的硫铁矿成分,恰是

这些物质在煤燃烧过程中分解出硫并与空气中的氧化合生成 SO₂。如果能把锅炉燃用的煤粉中含有的硫铁矿物质去掉,就可大大减少煤粉燃烧产生的 SO₂。

纯煤主要是 C 元素,它是逆磁性物质,而煤粉中含有的硫铁矿物质却是顺磁性物质,因此可用梯度磁场产生的磁力把它从煤粉里分离出来。所谓梯度磁场是指在磁场中单位距离内磁场强度变化,它是非均匀的。我们采用在磁场空间填充高导磁率的不锈钢毛,从而使磁场中磁力线仅密集于钢毛表面,引起磁场内磁力线各处稀疏不均,进而形成一个梯度磁场。梯度磁场的强弱与材质的磁化强度、形状、直径、填充率有关。硫铁矿物质在磁场内所受的磁力 F_m 可用下式表示:

$$F_m = X \cdot V \cdot H \frac{dH}{dX} \quad (1)$$

式中, X 为硫铁矿颗粒物的磁化率, V 为颗粒物体积, H 为磁场强度, $\frac{dH}{dX}$ 为磁场梯度。从上式可以清楚地看出,要想把硫铁矿物质从

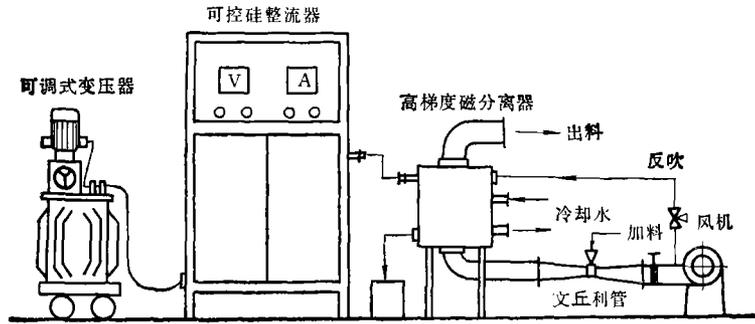


图 1 试验工艺流程示意图

煤中较彻底地分离出来，就需要有较大的磁力，而较大磁力的获得又需较高的磁场梯度。同时，把煤粉颗粒磨的越细越好，从而使颗粒物获得较高的磁化率。在上述磁分离理论基础上建立起来的干煤粉磁法脱硫工艺流程及主要设备装置如图 1、2 所示。

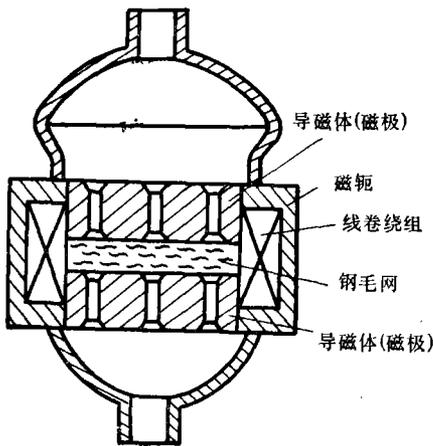


图 2 高梯度磁分离器内部结构

图 1 中可调式变压器是将 380V 交流电压变成试验所需电压 12V 左右。可控硅整流器是把交流整成直流，然后输入高梯度磁分离器。高梯度磁分离器结构见图 2。外壳是一个钢制筒体，内部由导磁体、磁轭、线圈、不锈钢毛组成。导磁体是上下两块形状如同家用蜂窝煤的钢体。两块导磁体之间充压着用不锈钢毛编织的滤网。滤网多层叠置在一起，既形成梯度磁场，又有分层吸附磁铁矿物质的作用。导磁体外周有线圈绕组，线圈与

导磁体之间有磁轭固定连接。磨细的煤粉通过喂料机及喂料鼓风机输送。文丘里管喉部形成的负压可自动进料，煤粉自下而上通过磁分离器，磁铁矿粉粒被层层不锈钢毛网吸附，脱过硫的煤粉从分离器上部出料口收集。分离后被不锈钢毛网吸附的硫铁矿粉粒可通过反向鼓风吹出收集。高梯度磁分离器在运行中因磁滞而产生的高温可引入冷却水进行冷却。

二、试验与分析

试验煤种选用含硫量较高的(3%左右)徐州夏桥煤矿大仓原煤。采样 1000kg，按 GB474-77 国标工艺要求进行粉碎，掺合和过筛，分成 80 目、100 目、120 目三个粒度级然后将样品分袋装好以备试验。

试验采用正交试验法。整个试验过程取三个因素、三个水平。三个因素是磁场强度、煤的粒度、煤粉颗粒通过磁场的速度。最后一个因素涉及给煤量和风速，通过试验寻找最佳煤粉通过磁分离器的速度。三个水平分别是：(1) 磁场强度取值为 0.5T、0.6T 和 0.75T [T 为磁场强度单位，1T (特斯拉) = 10⁴Gs (高斯)]; (2) 煤粉颗粒度分别为：80 目 (0.16mm)、100 目 (0.127mm)，120 目 (0.104mm); (3) 煤颗粒通过分离器的速度，此值可折算成电磁振动喂料机的电流值 [鼓风机的流量和风速调为恒定值]。分为：慢速 (40mA)，中速 (50mA)，快速 (60mA)

表 1 $L_9(3^4)$ 试验表

编 号	水 平 因 素	A	B	C	D	X
		场 强 (T)	粒 度 (目)	速 度 (mA)	空 列	脱 硫 率 (%)
1		$A_1 0.5$	$B_1 80$ 目	$C_1 50$	1	X_1
2		$A_2 0.5$	$B_2 100$ 目	$C_2 60$	2	X_2
3		$A_3 0.5$	$B_3 120$ 目	$C_3 40$	3	X_3
4		$A_4 0.6$	$B_4 80$ 目	$C_4 60$	3	X_4
5		$A_5 0.6$	$B_5 100$ 目	$C_5 40$	1	X_5
6		$A_6 0.6$	$B_6 120$ 目	$C_6 50$	2	X_6
7		$A_7 0.75$	$B_7 80$ 目	$C_7 40$	2	X_7
8		$A_8 0.75$	$B_8 100$ 目	$C_8 50$	3	X_8
9		$A_9 0.75$	$B_9 120$ 目	$C_9 60$	1	X_9

表 2 干煤粉磁法脱硫试验结果

次 数	列 号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1		3.38	2.0	1.88	1.02	2.42	1.49	1.23	1.77	1.42
2		3.32	1.78	1.89	1.04	2.44	1.51	1.24	1.79	1.44	0.81
3		3.38	1.85	2.13	1.18	1.59	2.42	1.03	1.51	0.88	0.83
4		3.46	2.01	2.14	1.22	1.62	2.48	1.13	1.54	0.89	0.84
5		3.08	2.0	1.60	1.08	3.17	1.30	0.97	3.17	1.30	0.99
6		3.38	1.98	1.61	1.10	3.10	1.25	0.98	3.19	1.32	1.00
7		3.31	1.89	1.26	1.09	0.87	1.30	0.94	0.75	1.25	0.98
8		3.30	1.75	1.27	1.04	0.89	1.32	0.96	0.69	1.33	1.00
9		3.32	2.0	1.27	1.14	0.90	1.29	1.06	0.70	1.30	1.03
\bar{x}		3.33	1.90	1.47	1.10	1.85	1.60	1.03	1.68	1.24	0.92
X (%)		100	43	55	67	45	52	68	49	63	72

三个档次。选用正交试验表头： $L_9(3^4)$ 列号表头设计得到表 1。

按表 1 列的正交试验顺序做的试验结果列于表 2。其中脱硫率的计算方法是将 9 个 0 子样的平均值（其值为 3.33）看成 100%，其计算公式为 $\frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100\%$ 。式中， X_1 代表脱硫前的值， X_2 代表脱硫后的值。试验结果见表 2。

干煤粉在进入磁分离器前和经磁选分离后，其煤粉的含硫量均用 ZCL 自动测硫仪测定。该仪器的测试误差为 $\pm 3\%$ ，每次磁选脱硫试验的测试必须确保质量平衡，即分离前煤粉总质量必须等于分离出磁铁矿粉质量，加上分离脱硫后煤粉质量，若不能满足质

量平衡，则测试无效。

从上表的测试结果可以看到，磁场强度、煤粉的颗粒度、煤粉通过磁场的速度，是影响磁选脱硫的三个极为重要的因素。试验证明梯度磁场强度越高脱硫效率越高，但产生过强的场强耗电量也增加很多，通过上百次的试验优选最佳的场强为 0.65—0.75T。试验也证明：煤粉颗粒磨的越细，磁选脱硫效果越好。但太细的煤粉会大大提高磁选脱硫的成本。其最佳煤粉颗粒度在 100 目—120 目范围内。煤粉通过磁场的速度取决于鼓风机的风量，喂料机的喂料速度，不锈钢毛网的层数三个因素。煤粉通过不锈钢毛网层的流动是复杂的多向流，要实测流过网层的速度十分困难，为此我们通过大量试验，选择较佳的鼓

风量，然后把它固定下来看作不变量。接着考虑到煤粉流经网层的阻力，以及网层重叠后实际的流道面积，决定较佳网层数为 5 层。以上二个因素固定后，唯一能改变的就是喂料速度，此值折算成电磁振动喂料机的电流值。通过试验证明，最佳电流值在 50mA—60mA 的范围内。

从表 2 可见，在磁场强度、煤粉颗粒度以及煤粉通过磁场的速度不断变化的情况下其脱硫效率在 40—70% 之间，在最佳三因素条件下脱硫率在 70% 左右，不可能再高，这主要由于煤粉中除了含硫量高的磁铁矿物质（无机硫）外，还含有数量不多的有机硫，它们与动植物的腐殖质混合在一起，组分十分复杂，至今国内外还没有一种十分理想的直接测定法。煤的有机硫含量，通常通过煤中全硫含量减去无机硫含量求得，一般有机硫含量占总硫量的 15—20%。这就是磁选脱硫效率很少能超过 70% 的主要原因。美国肯塔基大学采矿工程系 D. L. Kiser 教授 1985 年来华参加中美“洁净煤基燃料讨论会”时指出：HGMS 法脱硫，脱硫率一般在 55—80% 之间。由此看来，本试验已接近国外同类型试验的水平。主要差距是磁场强度比国外低，煤粉颗粒度还较粗。国外使煤粉多次通过磁分离器，本试验只通过一次，因受到设备和资金的限制，有待今后实际使用中进一步开发。

还不能对高梯度磁分离器磁法脱硫工艺的经济指标做全面分析，仅能做一初步分析。经济效益取决于工艺设备投资和运行费用。本课题工艺设备投资 2 万元，设计使用寿命为十年，每年折旧费加维修费约 3 千元。处理能力为 1t/h 煤粉，耗电量约 10kW·h，折价 2 元。用于磁分离的煤粉比一般电厂锅炉使用的煤粉细很多，因此每吨煤粉碎费用增加 2.5 元，再加上操作者工资 2 元/h。以上各项总汇，每吨干煤粉磁法脱硫其费用约 7.5 元左右。从国外资料看，美国纽约州 J. K. Kinding 用高梯度磁法脱硫，每吨处理费用为 1.3 美元（折合人民币 6.5 元）相比较，本法处理费用略高。

燃煤脱硫本身是一项耗资较大的项目，全面分析它的经济效益还很难，因为 SO₂ 对人类所造成的经济损失还无法进行精确计算。国外有关专家认为，燃煤脱硫最根本的出路是前端处理，并预言 1995 年之后磁法脱硫必定商品化，到 2000 年，磁法将是燃煤脱硫主要工艺之一。

参 考 文 献

[1] 张兆庆等, 中华生物磁学杂志, 1(1), 18(1987).
 [2] Kiser, D. L., 中美洁净煤基燃料讨论会论文集, 煤炭综合利用篇, 第 56 页, 山西省科技情报所编, 1985 年.
 [3] 北京煤化学研究所编著. 煤炭化验手册, 第 2 版, 第 352 页. 煤炭工业出版社, 北京, 1981 年.

(收稿日期: 1989 年 11 月 5 日)

三、效 益 初 析

本课题仅是在实验室内做的中型试验,

(上接第 92 页)

A Simple Algorithm for Identification of Environmental Background Values *Xin Shichong et al.* (73)
 Design Thinking of A Greening Project in and around A Petrochemical Complex... *Chin Zigin* (76)
 Scope News..... (79)
 Books Review..... (80)
 News in Brief (81)
 INDEX 1990..... (89)
 Abstracts in English (93)

In this study a pilot upflow anaerobic sludge blanket reactor of capacity of 6.7 m³ was used at ambient temperature (about 20°C) to treat brewery wastewater (the influent COD concentration was about 2400 mg/L).

Seed sludge was obtained from an Imhoff tank. By controlling the operation conditions granular sludge was well formed. A volumetric COD loading up to 10–13 kg/m³·d was achieved with more than 85% removal of COD.

Key Words: upflow anaerobic sludge blanket reactor, ambient digestion, sludge granulation, brewery wastewater.

An Experimental Study on Desulfurization of Pulverized Coal Firing by Magnetic Separation.

Wu Shibing, Zhang Hengjian, Zhang Sijing (Xuzhou Municipal Institute of Environmental Protection, Jiangsu Province): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(6), 1990, pp. 25–28

Desulfurization of pulverized coal firing by magnetic separation is one of important methods that remove SO₂ from firing coal. The key technology of desulfurization is to apply appropriately a high-gradient magnetic separator. The authors first completed the experiments in China during 1987–1989. The paper introduces briefly the technological process and results.

Key Words: desulfurization, pulverized coal firing, magnetic separation.

Investigation of Organic Pollutants in the Songhuajiang River Basin.

Xu Zhiyi, Gao Yifei, Cao Shuying, He Zunshi, Jia Yiqun (Changchun Institute of Applied Chemistry, Academia Sinica): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(6), 1990, pp. 29–31.

The organic pollutants in the Songhuajiang River basin have been analyzed with GC, GC/MS, HPLC and TIC methods, water samples were treated in situ for GC/MS and HPLC and treated in the laboratories for GC and TIC. The samples were collected in winter and summer. 152 organic compounds were detected out. Among them, 19% were PAHs, 14% were chlorocompounds, 13% aromatic compounds and 54% others. Most of the organic compounds polluting some sections of the River have been found from the analytical results.

Key Words: organic pollutants, the Songhuajiang River basin.

Determination of Chemical Oxygen Demand without Using Mercury Salts.

Han Xiangkui, Yao Xiuqin, Liu Ying (Jilin Colle-

ge of Architectural and Civil Engineering, Jilin): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(6), 1990, pp. 32–34

This method is based on the principle that potassium dichromate and chlorine (Cl₂) can be quantitatively determined. An absorber was used to absorb Cl₂ that was the product of what dichromate oxidated. Then iodimetry was used to determined the residual chlorine, of which the equivalent numbers were subtracted from the equivalent numbers of the dichromate consumed. Thus the interference of chloride was eliminated. The result showed that the method was of higher accuracy and precision and reproducibility of results covered a wide range of chloride concentrations.

Key Words: Chemical Oxygen Demand, determination, without mercury salts.

Conservation of Soil Resources in the Scenic Regions of the Huanshan Mountain, Jiuhuashan Mountain and the Tianzhushan Mountain.

Chen Conghong (The Agriculture-Animal Husbandry-Fishery Department of Anhui Province, Hefei): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(6), 1990, pp. 35–40.

The author has made a survey of soil resources in the three famous scenic mountains, and found that soil resources are getting deteriorative there, facing a potential crisis. Its anthropocentric causes are mainly due to soil erosion aggravated by over-cultivation, construction of highway and tourist facilities as well as excessive numbers of tourists so that soil and the environment in the landscape regions burden with heavy pressure. The article presents some measurements to preserve the landscape soil, such as speeding up greening barren hills, moderate utilization of landscape resources, development of soil amelioration in the regions, development of local special products, strengthening eco-environmental protection around the regions etc.

Key Words: conservation, soil erosion, scenic mountain.

Aluminum in Acidic Soils and Its Phytotoxicity.

Tian Rensheng, Liu Houtian (Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing): *Chin. J. Environ. Sci.*, 11(6), 1990, pp. 41–46.

Made in this paper is a general review on following topics: (1) factors of soil acidification and process of aluminum activation; (2) the symptoms of Al-injured plants, the resistance of plants to aluminum and the relationship between aluminum speciation and phytotoxicity; (3) the external factors affecting aluminum toxicity expression, such as P, Ca and organic matter; and (4) some mechanism of Al phytotoxicity relating to biomembrane,