

干法半干法脱硫灰及其焙烧产物在农业上应用的安全有效性研究评价

李 静, 石 林

(华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要:通过对邯郸马头电厂、广州恒运电厂的 2 种脱硫灰以及广州恒运电厂脱硫灰与钾矿石高温焙烧产物进行了物理特性和化学成分分析,并在不同 pH 值下进行了浸出实验,对可溶的有效元素、微量元素特别是重金属的含量进行分析比较,对 3 种实验样品农业应用的安全有效性进行了研究评价。结果表明,3 种样品的重金属 As、Cr、Cu、Mo、Ni、Pb、Zn、Cd 含量均远远小于国家标准,得出可以在农业上的安全使用;样品中的有效元素 Ca、Mg、Fe、Al、Na、Si 的含量均在 0.01%~1%之间,尤其是钾元素,实验浸出值在 5%左右,可以在农业上得到有效的利用,因此在农业上应用有一定的有效性。

关键词:脱硫灰;有效元素;重金属;安全性;有效性

中图分类号:X773 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0204-07

Study of the Efficacy and Safety of Dry and Semi-Dry Desulfurization Residues and Its Calcined Product Use in Agriculture

LI Jing, SHI Lin

(College of Environmental Science and Engineering South China University and Technology, Guangzhou, 510006, China)

Abstract: Desulfurization residues from two power plants (Matou, Handan, Hebei, and Hengyun, Guangzhou, Guangdong) were studied, together with the calcined product from Hengyun, after calcining with K-feldspar. The physical properties and chemical composition were determined. Leaching experiments at various pH were undertaken to find the soluble effective element composition, along with the trace element composition, especially for heavy metals. The purpose is to study the efficacy and safety of these residues for use in agriculture. As, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn and Cd for all three samples were at concentrations below the National standard for use in agriculture. The effective element percent concentrations of Ca, Mg, Fe, Al, Na and Si were all between 0.01% and 1%. The leached concentration of K was up to 5%. These levels were beneficial in agriculture. The effective element and heavy metal concentrations all fell with increasing pH. Leaching of heavy metals and effective elements occurs most readily at low pH.

Keywords: desulfurization residues; effective element; heavy metal; safety; efficacy

干法半干法脱硫技术是近期发展较快的一类烟气脱硫技术。这类技术具有产物为干粉状和耗水率低的优点,很好地克服了湿法脱硫工艺的一些问题和不足,而且具有投资低、工艺简单、维护方便、占地少、脱硫效率范围广、与机组配合性良好、运行可靠及适应

性强的优点,是目前最受关注的脱硫技术之一^[1]。

干法半干法脱硫灰一般都由亚硫酸钙、硫酸钙、碳酸钙、氢氧化钙、少量氯化钙、氟化钙以及部分粉煤灰组成,其中 CaO 和 SO₃ 含量均明显高于普通粉煤灰^[2-3],并且其组成和性能的变化都较大^[4-5]。有关脱硫灰的应用一直是人们所关注的问题,但是脱硫灰的这些成分大大地限制了脱硫灰的应用范围。首先,根据国家标准^[6]:水泥生产中用作活性混合材的 I、II 级灰以及拌制水泥混凝土和砂浆时,用作掺和料的粉煤灰成品的 I、II、III 级灰中 SO₃ 含量均不得大于 3%。而脱硫灰中 SO₃ 的含量却高达 6%~8%^[4,7]。其

收稿日期:2008-04-03

基金项目:国家星火计划项目(2006EA105017);广州市污染防治新技术新工艺研究开发项目(2006440003121132)

作者简介:李 静(1983—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事脱硫灰的综合资源化利用研究。

E-mail:lijing0bingdou@163.com

次,脱硫灰中还含有较多的可溶性卤化物(CaCl_2 和 CaF_2),它们的存在会降低脱硫灰的活性。再次,脱硫灰中高含量的游离态氧化钙^[8]也使脱硫灰在应用过程中会吸水膨胀,放出热量,使得水化时间延长,体积持续膨胀^[9]。

但是,脱硫灰渣中还含有农作物所必需的活性 Si、Ca、S 以及 K、Fe、Mg、Cu、Zn、B 和 Mo 等微量元素,加之具有改善土壤结构、减少土壤中无机磷的流失、调节土壤酸碱度和无明显污染等优点,脱硫灰在农业上的应用越来越受到人们的关注。预计今后脱硫灰在农业上的应用将是脱硫灰应用的一个主要方面,在国内外已有很多有关的报道。清华大学的研究表明^[3]:施用脱硫灰,不论对石灰质或酸性土壤都具有调节作用。Clark R B 等^[10]研究也表明:脱硫灰可以修复酸性土壤,减轻由于 pH 太低而引起的铝和锰对作物的毒害;提供植物所需要的养分如钙、硫、镁含量,改善土壤物理性质;有利于疏松板结土壤,改良钠质土;减少土壤中磷的流失;将脱硫灰与有机肥(粪肥,堆肥,生物固体)复合施用,也非常有利于作物增产。Sloan J J 等^[11]发现脱硫灰是作物易吸收的有效磷的主要来源,特别是在作物生长后期效果更为明显。

但在农业上应用时,灰渣中的重金属超标问题和有效元素的可利用问题一直受到关注。因此,脱硫灰在农业上应用的安全性及有效性成了脱硫灰能否正常在农业上应用的瓶颈问题。

本实验以邯郸马头电厂,广州恒运电厂的脱硫灰和广州恒运电厂脱硫灰与钾矿石的高温焙烧产物^[12] 3 种样品为例,将其在不同 pH 值下进行浸出特性实验,测定样品中重金属和有效元素在不同 pH 下的溶出量,并与相关国家标准比较。通过数据模拟得出在不同的 pH 下重金属和有效元素的溶出规律曲线,对其农业上应用的安全性和有效性进行了初步研究评价。

1 样品来源、产出状态及物理特性

本文实验所用的样品是分别采自邯郸马头电厂和广州恒运电厂的 2 种脱硫灰以及增产效果更好的广州恒运电厂脱硫灰与钾矿石的高温焙烧产物。

样品 1:采自邯郸马头电厂的脱硫灰,脱硫工艺为 SDA 脱硫技术。

该法是将石灰用过量的水混合或者消化成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆液,以石灰浆液作吸收剂,浆液在喷雾干燥吸收塔内被雾化成细液滴,水被烟气蒸发。烟气在吸收塔内有足够的停留时间使 SO_2 与其他酸性气体

同 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 $\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$ 和 CaCl_2 。

样品 1 在反应器出口,直接形成了干的、白灰色粉末。

样品 2:采自广州恒运电厂。其脱硫工艺为炉后循环流化床。

该法是在锅炉和除尘器之间安装了一个流化吸收塔。烟气从塔底部流化床进入,同时喷入消石灰浆,塔内烟气流速较高,故吸收剂在塔内呈悬浮流化态。烟气与吸收剂及再循环的物料不断相互混合,将烟气中的 SO_2 吸收,生成亚硫酸钙。在吸收塔中物料的密度很高,颗粒间不断发生碰撞而粉碎,使符合要求的细颗粒随烟气进入除尘器被收集,粗颗粒仍滞留在流化床底部。被除尘器收集下来的大部分固体颗粒又返回吸收塔内,继续参与脱硫反应。

样品 2 为含一定水分、粉末状高温聚合体,深灰色,颗粒间有一定的粘结性,但很快水分蒸干形成白灰色粉末。

样品 3:由恒运电厂脱硫灰与钾矿石按一定比例进行复合,混合均匀后进行烘干,在 1050°C 下焙烧 2 h,焙烧产物即得样品 3。因为脱硫灰中含有大量可使钾矿石发生热分解所需要的助熔剂,一类为 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaO ,它们在焙烧过程中会以 CaO 的形式存在;另一类为 CaSO_4 和 CaSO_3 , CaSO_3 也会在焙烧过程中氧化成 CaSO_4 ,而且 CaO 与 CaSO_4 之间的配比基本上符合矿石钾热分解所需要的助熔剂成分要求。从而产生的农作物所急需的一种含 K、Si、Ca 和 Mg 为主的复合肥料。

样品 3 为乳白色细颗粒粉末,松散、无粘结。

由于在农业上应用的要求,本文将 3 种样品的比表面积、微孔表面积、样品平均粒径、样品容重进行了分析(表 1)。

表 1 3 种样品的物理特性分析结果

Table 1 Physical characteristics and analytical results for three samples

	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	微孔表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	样品平均 粒径/nm	样品容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
样品 1	13.313 1	11.732 5	18.72	0.62
样品 2	2.755 4	1.935 8	11.80	0.67
样品 3	0.515 7	0.232 5	22.73	0.62

注:测试单位为中国科学院广州地球化学研究所。

为了更好地观察样品的物理形态,在 10×60 倍的显微镜下对 3 种样品进行观察(图 1)。

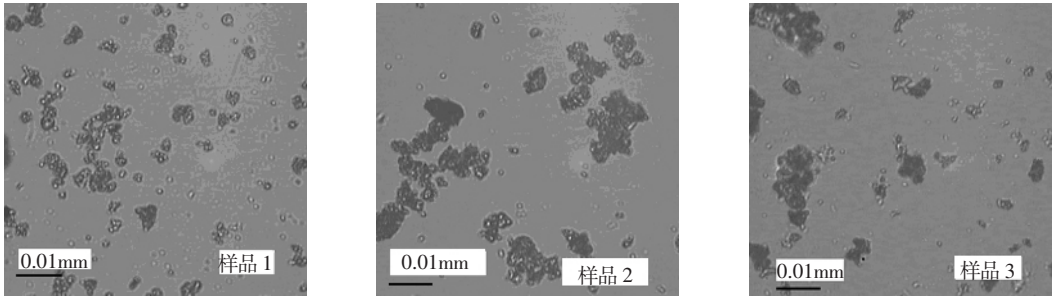


图 1 10×60 倍显微镜下样品形态

Figure 1 Sample shape under microscope at 10×600 magnification

由图 1 可以观察得,3 种样品均为圆形且表面光滑的颗粒,颗粒有轻微粘结现象,大部分颗粒均匀且分散,在农业上应用前无需再加工处理。

2 实验样品的化学成分

脱硫灰的化学组成对其性能和用途起了很大的决定作用,为了能更好地了解和应用脱硫灰,本文对这实验样品的化学成分进行了 X 荧光光谱分析和 ICP-AES 分析(表 2)。

考察表 2 中的各脱硫灰的化学成分可以发现,虽然均为脱硫副产品,并且应用相同的脱硫工艺,但彼此在化学组成上有比较大的差异。如邯郸马头电厂的钙、硅含量很高,均高于其他样品的分析数据,但其硫含量却低于恒运电厂脱硫灰,说明其脱硫灰中粉煤灰的含量较高,脱硫效果好。恒运电厂的脱硫灰,钙、硫含量很高,但相应的硅、铝、镁含量一般,说明其粉煤灰含量较少。样品 3 与其他样品明显不同的是,其化学组成中钾的含量可以达到 7%,远远高于其他样品中钾的含量,而钾是农作物及其必要的营养元素^[12],除了含钾量高外,钠、镁、铁等农业上可利用的有效元素含量均比其他两种样品的含量高,由此可以得出样品 3 在农业应用上应该比样品 1 和样品 2 有一定的肥效。

3 实验部分

浸出实验是用来测定固体废弃物浸出特性的一种方法^[13]。为了分析实验样品在不同 pH 值下的重金属和有效元素含量,本文对 3 种样品进行了不同 pH 条件下的浸出试验,以考察试验样品在不同类型土壤中的施用有效性和安全性。

3.1 实验样品空白 pH 值测定

将样品 1、样品 2 及样品 3 各取 5 g,分别加入 50 mL 蒸馏水进行搅拌,混合均匀,静置,测其空白样 pH 值,结果见表 3。

表 3 实验样品的空白 pH 值
Table 3 Initial pH

样品名称	pH
样品 1	10.08
样品 2	12.05
样品 3	10.7

由结果可以看出,3 种实验样品均为碱性,比较适合应用于南方的红壤、砖红壤等酸性土壤。

3.2 实验步骤

将实验盐酸配成比例为 1:1 的盐酸溶液作为基本浸取液。然后将 1:1 的盐酸溶液与蒸馏水在 X:(50-X)

表 2 三种样品的化学成分分析结果(%)
Table 2 Chemical composition of three samples

项目	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	烧失量
样品 1*	0.22	0.57	0.95	14.92	39.32	25.63	14.73	2.43	12.53
样品 2*	0.22	0.16	5.48	7.82	37.51	9.89	24.24	1.04	16.01
样品 3**	0.40	7.09	2.39	9.93	34.57	18.30	—	3.45	—

注:* 分析方法:X 射线荧光光谱(XRF)。测试单位:华南理工大学分析测试中心。
** 分析方法:ICP-AES。测试单位:暨南大学实验技术中心。
“—”代表成分未检测。

的比例下 (X 依次取 0.1、0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10) 配成一系列不同 pH 值下的浸取液 50 mL。将 3 种待测样品各自取 5 g, 在每个 pH 下进行浸出实验。将 5 g 样品与 50 mL 浸取液混合, 搅拌, 静置, 测其 pH 值。

因实验样品空白样的 pH 值不同, 所以与相同 pH 值盐酸混合后其混合液的 pH 值也不可能完全相同。为了实验的有效可比性, 将每个实验样品的一系列不同 pH 混合液在 pH0~2、3~4、4~6、大于 6, 4 个范围之间选取 4 个具有代表性的样品进行实验分析。样品编号分别为样品 1-1, 样品 1-2, 样品 1-3, 样品 1-4; 样品 2-1, 样品 2-2, 样品 2-3, 样品 2-4; 样品 3-1, 样品 3-2, 样品 3-3, 样品 3-4。然后将选出的样品过滤得其滤液。滤液按其分析项目立即分析或加入相应的保护剂待分析。

3.3 实验样品滤液分析及结果

为了对实验样品有个全面的了解, 实验的分析项目有: pH、K、Na、Ca、Mg、Cr、Al、Si、Mo、As、Cd、Sn、Cu、Fe、Ni、Mn、Zn。

分析方法: ICP-AES。

对分析结果进行整理计算, 将有效元素换算成氧化物的形式, 微量元素单位换算成 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 4、表 5)。

表 4 不同 pH 值下各实验样品有效元素含量(%)

Table 4 Effective composition of samples at different pH (%)

样品编号	pH	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
样品 1-1	1.63	0.08	0.90	0.89	0.55	21.34	0.03	0.10
样品 1-2	3.72	0.07	0.70	0.68	0.22	14.78	0.01	0.05
样品 1-3	5.28	0.05	0.40	0.34	0.02	4.07	0.002	0.003
样品 1-4	7.12	0.04	0.24	0.02	0.02	0.88	0.000 5	3.43E-05
样品 2-1	0.89	0.09	0.14	3.47	0.79	25.06	0.28	0.14
样品 2-2	3.53	0.08	0.10	3.04	0.51	20.29	0.06	0.07
样品 2-3	4.69	0.06	0.03	2.04	0.10	11.72	0.04	0.03
样品 2-4	6.06	0.05	0.02	0.72	0.005	3.98	0.004	0.000 6
样品 3-1	0.78	0.22	4.98	1.05	2.77	14.49	0.32	0.09
样品 3-2	3.55	0.21	4.64	0.44	0.26	9.00	0.20	0.003
样品 3-3	5.39	0.20	4.59	0.37	0.05	7.29	0.02	0.003
样品 3-4	8.38	0.19	4.59	0.09	0.002	2.90	0.005	7.58E-05

注: 分析方法为 ICP-AES, 测试单位为暨南大学实验技术中心。

4 实验结果分析与讨论

4.1 不同的 pH 环境对实验样品有效元素浸出浓度的影响

根据表 4 的实验结果, 可以得到各实验样品的有

表 5 不同 pH 值下各实验样品重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 Heavy metal content of samples at different pH

样品编号	pH	As	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	Cd
样品 1-1	1.63	6.51	3.20	7.25	0.77	1.44	4.54	5.93	0.29
样品 1-2	3.72	2.46	1.34	3.74	0.73	0.90	0.95	4.03	0.13
样品 1-3	5.28	0.67	0.18	0.78	0.68	0.27	0.03	1.24	0.01
样品 1-4	7.12	0.03	0.03	0.09	0.58	0.02	未测出	0.29	未测出
样品 2-1	0.89	11.17	6.65	7.22	2.04	3.84	7.67	13.41	0.59
样品 2-2	3.53	3.63	2.75	4.04	1.71	2.71	2.33	9.25	0.29
样品 2-3	4.69	0.33	0.42	1.22	1.46	1.79	0.44	4.03	0.14
样品 2-4	6.06	0.18	0.03	0.41	1.08	0.85	0.24	1.46	0.04
样品 3-1	0.78	5.96	4.12	13.6	0.70	3.95	8.65	4.78	0.23
样品 3-2	3.55	1.34	3.13	3.89	0.61	1.61	3.69	1.48	0.13
样品 3-3	5.39	1.01	3.07	2.66	0.61	0.49	0.60	0.93	0.08
样品 3-4	8.38	0.21	2.95	0.18	0.54	0.49	0.07	0.45	未测出

注: 分析方法为 ICP-AES, 测试单位为暨南大学实验技术中心。

效元素在不同 pH 值下的浸出情况, 见图 2~7。

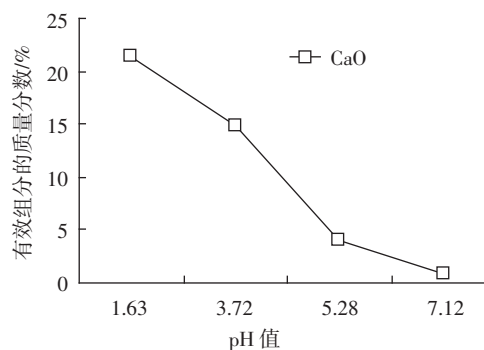


图 2 样品 1 有效元素不同 pH 值下的变化(1)

Figure 2 Change of effective composition of sample 1 at different pH(1)

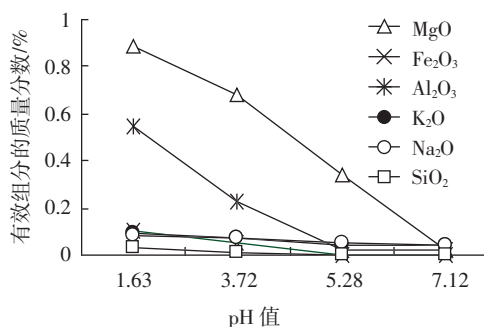


图 3 样品 1 有效元素不同 pH 值下的变化(2)

Figure 3 Change of effective composition of sample 1 at different pH(2)

由图 2~7 可见, 在不同的 pH 下, 各有效元素的含量都是随着 pH 值的增大而逐渐减少的。当混合后

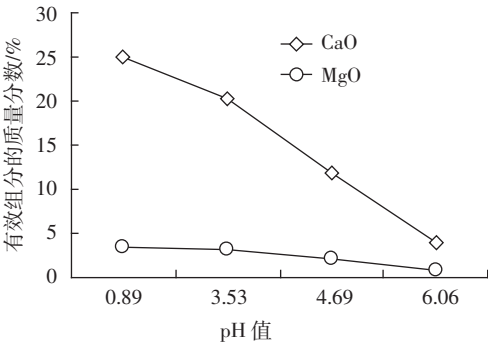


图 4 样品 2 有效元素不同 pH 值下的变化(1)
Figure 4 Change of effective composition of sample 2 at different pH(1)

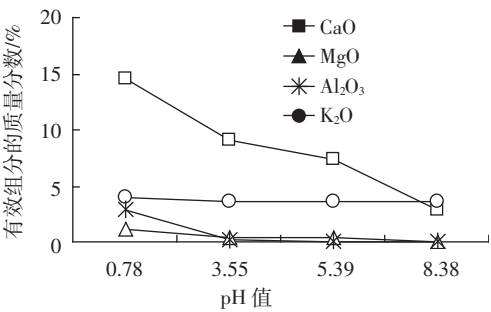


图 6 样品 3 有效元素不同 pH 下的变化(1)
Figure 6 Change of effective composition of sample 3 at different pH(1)

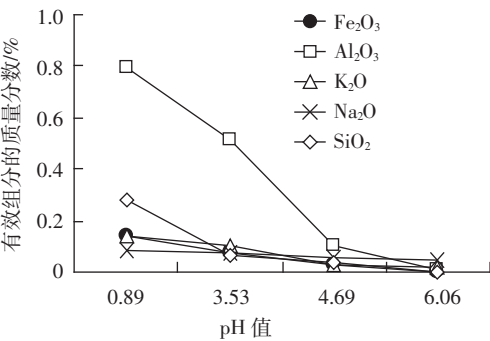


图 5 样品 2 有效元素不同 pH 值下的变化(2)
Figure 5 Change of effective composition of sample 2 at different pH(2)

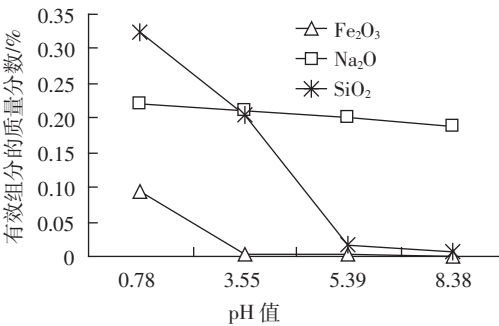


图 7 样品 3 有效元素不同 pH 值下的变化(2)
Figure 7 Change of effective composition of sample 3 at different pH(2)

的 pH 为强酸性时,有效元素的含量是最大的,而当变至中性时有效元素含量则减至较低。由于脱硫灰是碱性物质,一般可以应用的土壤只能是酸性土壤,比如南方的红壤 pH 在 4~5,施用后,土壤的 pH 范围一般会在 5~9 内。实验中,当 pH 在 5~9 之间时,除 CaO 外,各有效元素的百分含量为 0.01%~1%,均在农业上可利用的范围以内^[17]。尤其是样品 3,其中对植物十分有用的钾元素,在 pH 中性时,仍可以达到将近 5% 的含量,并且随着 pH 的变化,钾元素的含量几乎不变,说明其在农业上具有一定的肥力。

4.2 不同的 pH 环境对实验样品微量组分浸出浓度的影响

根据表 5 的实验结果,可以得到各实验样品的微量组分在不同 pH 值下的浸出情况,见图 8~10。由图 8~10 可见,供试样品中微量元素的含量随 pH 值增大而减少,即低 pH 浸提有利于重金属的溶出,这同文献中的相关报道是一致的^[15-16]。

4.3 实验样品农业应用的安全性及有效性分析

对于各实验样品的可应用性分析,主要是分析其

重金属在农业的利用上是否超标。国家目前尚未颁布脱硫灰中有毒有害物质控制标准,仅提供了对农用粉煤灰中重金属污染物控制标准 GB8173—1987(表6)。因此本文也相对应的对 Cd、As、Mo、Se、Ni、Cr、Cu、Pb 等元素进行了分析。由表 5 中最高含量和表 6 中最低

表 6 中华人民共和国国家农用粉煤灰中重金属污染物控制标准 GB8173—1987(mg·kg⁻¹ 干粉煤灰)

Table 6 Heavy metal contamination control standard GB8173—1987 for agricultural coal ash in China (mg·kg⁻¹ dry coal ash)

项 目	最高允许含量	
	在酸性土壤上(pH<6.5)	在中性和碱性土壤上(pH>6.5)
总镉(以 Cd 计)	5	10
总砷(以 As 计)	75	75
总钼(以 Mo 计)	10	10
总硒(以 Se 计)	15	15
总镍(以 Ni 计)	200	300
总铬(以 Cr 计)	250	500
总铜(以 Cu 计)	250	500
总铅(以 Pb 计)	250	500

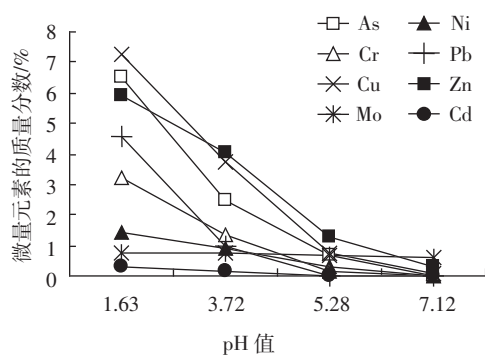


图8 样品1微量元素不同pH值下的变化

Figure 8 Change of trace element of sample 1 at different pH

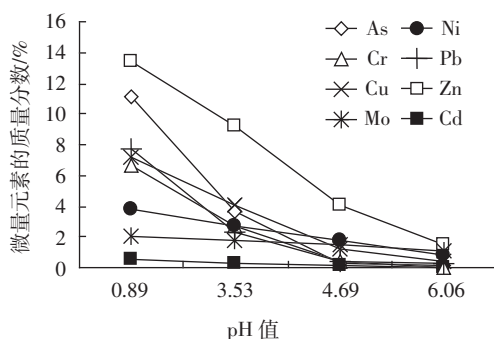


图9 样品2微量元素不同pH值下的变化

Figure 9 Change of trace element of sample 2 at different pH

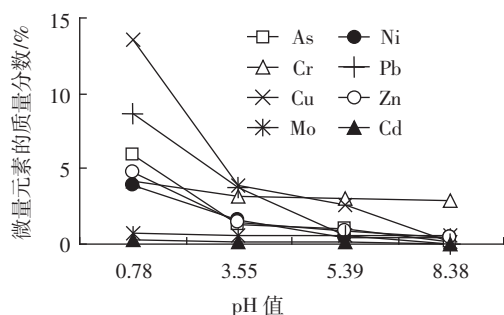


图10 样品3微量元素不同pH值下的变化

Figure 10 Change of trace element of sample 3 at different pH

的标准值做对比图(图11),发现3种样品中各个微量元素的最高含量,都远小于重金属污染物控制标准。因此,实验中的3种样品都可以在农业上安全应用。

关于实验样品的有效性,对3种实验样品进行了分析。当pH增大时各样品有效元素百分含量明显降低,但仍然在农业的可应用范围之内^[17]。因此,实验样品在农业上的应用有一定的有效性,可以补充一些作物需要的元素。

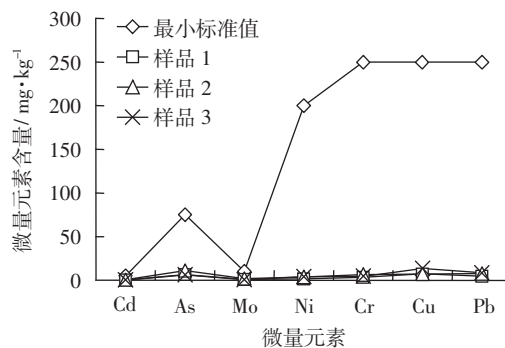


图11 微量元素国家标准与分析结果比较

Figure 11 National standard for trace elements, compared to the results

5 结论

(1)通过不同pH下3种样品的浸出实验可以得出,实验样品中有效元素和重金属的含量都会随着pH的增大而降低,因此pH值越低越有利于样品中有效元素和重金属的浸出。

(2)通过将试验过程中得到最高的重金属含量与国家农用粉煤灰中重金属污染物最低的控制标准的比较,得出实验样品在农业上应用是安全的,其重金属完全不会超标,可以安全使用。

(3)实验样品有效元素的含量属于农业可应用范围之内,大部分为植物生长所需要的元素,尤其是样品3,钾含量比较高,可以达到5%,可以作为复合肥料使用。今后在农业上应用预计会有明显的增产效果。

本实验通过对3种试验样品初步的特性分析,可以明确的得出,3种实验样品:邯郸马头电厂脱硫灰,广州恒运电厂脱硫灰,及实验室中广州恒运电厂脱硫灰与钾矿石的高温焙烧产物,在农业应用上具有安全性和有效性。

参考文献:

- [1] 包正宇. 不同类型脱硫渣的主要特性及资源化利用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- BAO Zheng-yu. Comprehensive utilization and major characteristics of different types ashes after desulfurization[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [2] 钱骏, 徐强. 干法脱硫灰渣的性能及应用探索[J]. 应用技术, 2003(5): 43-46.
- QIAN Jun, XU Qiang. Properties of dry desulfurized ash and exploration of its use[J]. *Application Technology*, 2003(5): 43-46.
- [3] 宋拙夫, 朱跃, 张铁柱, 等. 干法半干法烟气脱硫技术脱硫渣的综合利用[J]. 电站系统工程, 2002, 18(2): 49-51.
- SONG Zhuo-fu, ZHU Yue, ZHANG Tie-zhu, et al. Comprehensive uti-

- lization of slag in dry and semi-dry FGD technology [J]. *Power System Engineering*, 2002, 18(2):49-51.
- [4] 王文龙, 崔琳, 马春元, 等. 干法半干法脱硫灰的特征与综合利用研究[J]. 电站系统工程, 2005, 21(9):27-29.
- WANG Wen-long, CUI Lin, MA Chun-yuan, et al. Study on properties and comprehensive utilization of dry and semi-dry desulfurization residues[J]. *Power System Engineering*, 2005, 21(9):27-29.
- [5] Kost D A, Bigham J M, Stehouwer R C, et al. Chemical and physical properties of dry flue gas desulfurization products[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005(34):676-686.
- [6] GB1596—1991, 用于水泥和混凝土中的粉煤灰标准号[S].
- GB1596—1991, The standard number of Fly-ash used in Cement and Concrete[S].
- [7] 张瑞荣, 贾海红. LIFAC 脱硫灰的特征及研究现状[J]. 粉煤灰综合利用, 2003(6):33-35.
- ZHANG Rui-rong, JIA Hai-hong. Property and research situation of LIFAC desulfurization residue[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2003(6):33-35.
- [8] 陈伟宏, 周全, 周军. 浅谈 LIFAC 粉煤灰的综合利用[J]. 粉煤灰, 2003(1):31-33.
- CHEN Wei-hong, ZHOU Quan, ZHOU Jun. Initial discussion on comprehensive utilization of LIFAC fly ash[J]. *Fly Ash*, 2003(1):31-33.
- [9] Bigham J M, Kost D A, Stehouwer R C, et al. Mineralogical and engineering characteristics of flue gas desulfurization products[J]. *Fuel*, 2005, 84:1839.
- [10] Clark R B, Ritchey K D, Baligar V C. Benefits and constraints for use of FGD products on agricultural land[J]. *Fuel*, 2001, 80:821-828.
- [11] Sloana J J, Dowdy R H, Dolana M S, et al. Plant and soil responses to field-applied flue gas desulfurization residue[J]. *Fuel*, 1999, 78:169-174.
- [12] 柯亮, 石林, 耿曼. 脱硫灰渣与钾长石混合焙烧制钾复合肥的研究[J]. 化工矿物与加工, 2007(7):17-20.
- KE Liang, SHI Lin, GENG Man. Research on preparing potassium compound fertilizer via roasting the mixture of potash feldspar with desulfurization ash[J]. *Chemical Industry Minerals Process*, 2007(7):17-20.
- [13] 钱枫, 曹慧芳, 张溱芳. 钙基脱硫灰渣浸出特性的研究[J]. 北京工商大学学报, 2003, 21(1):19-24.
- QIAN Feng, CAO Hui-fang, ZHANG Qin-fang. Study on leaching behavior of calcium-based desulfurization ashes[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University*, 2003, 21(1):19-24.
- [14] 唐中凡. 中国钾肥行业现状及发展趋势[J]. 新疆化工, 2007(1):23-33.
- TANG Zhong-fan. The present situation and development trend of potassium fertilizer industry in China[J]. *Xinjiang Chemical Industry*, 2007(1):23-33.
- [15] 刘京, 李国刚, 齐文启. 固体废物浸出试验条件的研究[J]. 上海环境科学, 1996, 15(7):36-38.
- LIU Jing, LI Guo-gang, QI Wen-qi. Study on test conditions of solid waste leaching[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1996, 15(7):36-38.
- [16] 常诚, 陆永琪, 周中平, 等. 燃煤飞灰浸取特性及脱硫反应活性研究[J]. 电力环境保护, 2000, 16(2):7-9.
- CHANG Cheng, LU Yong-qi, ZHOU Zhong-ping, et al. Study on leaching behavior of coal fired fly ash and desulfurization reaction activity[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2000, 16(2):7-9.
- [17] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 43-392.
- WANG Yun, WEI Fu-sheng. Soil element environmental chemical[M]. Beijing: China Environmental Science Publishing House, 1995: 43-392.