



## Removal of arsenic in lignite fly ash by nitric acid

Dajie HAN<sup>1,2</sup>, Shuhua MA<sup>2\*</sup>, Xiaohui WANG<sup>2</sup>, Jian DING<sup>2</sup>, Shili ZHENG<sup>2</sup>, Yang LUO<sup>2</sup>, Fen GUO<sup>1</sup>

1. School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

2. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** Based on the occurrence of arsenic in lignite fly ash, a new acid removal method for some arsenic in fly ash was established. The effects of reaction temperature, time and pH on the arsenic removal rate were investigated. The results showed that most of arsenic in lignite fly ash was enriched on the surface of lignite fly ash and existed in the form of arsenate such as calcium arsenate. The arsenic removal rate was inversely proportional to the pH value and the reaction temperature. Considering the factors such as the arsenic removal rate and the dissolution rate, the optimum conditions for acid removal of arsenic were pH=1, reaction temperature 20 °C, reaction time 1 h, the arsenic removal rate was 66.34%.

**Key words:** lignite fly ash; arsenate; acid method; arsenic removal; pH; temperature; time

## 硝酸脱除褐煤粉煤灰中的砷

韩大捷<sup>1,2</sup>, 马淑花<sup>2\*</sup>, 王晓辉<sup>2</sup>, 丁健<sup>2</sup>, 郑诗礼<sup>2</sup>, 罗扬<sup>2</sup>, 郭奋<sup>1</sup>

1. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029

2. 中国科学院过程工程研究所湿法冶金清洁生产技术国家工程实验室, 北京 100190

**摘 要:** 基于砷在褐煤粉煤灰中的赋存状态, 建立了酸法脱除粉煤灰中部分砷的新方法, 考察了反应温度、时间、pH 值等对脱砷率的影响。结果表明, 褐煤灰中的砷大多富集在煤灰表面并以砷酸钙等砷酸盐形式存在, 脱砷率与 pH 值和反应温度成反比。综合考虑脱砷率、溶损率等因素, 确定酸法最优脱砷条件为 pH=1、反应温度 20 °C、反应时间 1 h, 此时脱砷率为 66.34%。

**关键词:** 褐煤灰; 砷酸盐; 酸法; 脱砷; pH; 温度; 时间

中图分类号: TQ126.4<sup>+1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)04-0716-06

### 1 前言

粉煤灰是煤炭在燃煤电厂锅炉中燃烧后产生的固体废渣, 是我国目前最大的单一固体污染源。我国以煤炭为主的能源结构导致了粉煤灰量巨大, 2016 年我国火力发电量累计 43958 亿 kW·h, 占全国发电量的 74.37%, 粉煤灰排放量约为 5.8 亿 t。2016 年度粉煤灰行业发展报告中指出, 未来 5 年我国粉煤灰的产量预计仍高达 5.6~6.1 亿 t/a。粉煤灰大量排放与堆存不仅增加了电力

行业的生产成本, 制约了行业发展, 还占用大量土地, 同时粉煤灰中多种有毒重金属元素严重污染土壤和地下水。原煤中的挥发冷凝型微量重金属元素(如 As, Pb, Cr, Cd 等)在高温燃烧中挥发、气化, 进入温度较低的环境后富集于细小的飞灰中<sup>[1]</sup>, 其中 As 作为半挥发性金属, 主要排放于飞灰中。我国煤中砷平均含量为 6.4 mg/kg, 属于可安全用煤, 但不同煤种内的砷含量差异较大, 褐煤中砷含量最高<sup>[2]</sup>, 如贵州兴仁矿区褐煤中砷含量为 70.24 mg/kg<sup>[3]</sup>, 远高于平均含量, 由褐煤燃烧产

收稿: 2017-10-18, 修回: 2017-12-29, 网络发表: 2018-05-18, Received: 2017-10-18, Revised: 2017-12-29, Published online: 2018-05-18

基金项目: 地方科技攻关计划课题

作者简介: 韩大捷(1992-), 男, 安徽省合肥市人, 硕士研究生, 化学工程与技术专业, Tel: 18810155870, E-mail: 1058980556@qq.com; 马淑花, 通讯联系人, Tel: 13521118758, E-mail: shma@ipe.ac.cn.

**引用格式:** 韩大捷, 马淑花, 王晓辉, 等. 硝酸脱除褐煤粉煤灰中的砷. 过程工程学报, 2018, 18(4): 716-721.

Han D J, Ma S H, Wang X H, et al. Removal of arsenic in lignite fly ash by nitric acid (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 716-721, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217365.

生的粉煤灰中砷含量更高. 因此对褐煤粉煤灰的利用要关注砷污染问题.

目前, 国内对高砷烟尘脱砷研究较多, 蒋学先等<sup>[4]</sup>先用  $\text{H}_2\text{O}_2$  浸出预脱除烟尘中的砷, 再用石灰沉淀砷, 最后固化制砖; 易宇等<sup>[5]</sup>采用  $\text{NaOH}-\text{Na}_2\text{S}$  体系对高砷烟尘脱砷, 砷脱除率达 86.94%. 对粉煤灰中砷的脱除国内还未见报道, 国外有学者<sup>[6]</sup>曾用酸法脱除粉煤灰中的砷, 通过控制  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液 pH 值和避免粉煤灰表面吸附砷, 使煤灰中砷含量降至相关标准以下.

粉煤灰中砷的赋存状态直接决定了其脱除工艺, 许多研究已从热力学计算、逐级化学提取和具体表征分析等方面对粉煤灰中砷的赋存状态进行了深入研究. 刘迎晖等<sup>[7]</sup>采用化学热力学平衡分析方法研究了还原和氧化条件下氯元素对砷-煤系统的影响, 发现温度高于 800 K 时, 两种条件下的主要产物均为砷氧化物; Yan 等<sup>[8]</sup>也采用化学热力学平衡方法分析了某种煤的燃烧过程, 发现在煤燃烧的复杂体系中, 砷易与氧原子结合, 生成砷酸盐. Nurmesniemi 等<sup>[9]</sup>将粉煤灰中的重金属分为 5 种: 水溶态、可交换态、易还原态、可氧化态和残渣态; 苏华美<sup>[10]</sup>利用逐级化学提取法研究了锡林浩特胜利矿区煤样的燃烧产物中砷的赋存状态, 结果表明砷主要以碳酸盐结合态(总砷含量的 31.7%)和可交换态(总砷含量的 21.2%)存在; Zielinski 等<sup>[11]</sup>利用 X 射线吸收精细结构(XAFS)法研究了粉煤灰中砷的赋存状态, 结果表明粉煤灰中至少有 95% 的  $\text{As}^{5+}$ , 谱线与  $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  中 As 的谱线十分相似; Shah 等<sup>[12]</sup>发现所测粉煤灰中砷主要是以砷酸盐形式存在, 少量以亚砷酸盐形式存在; Huffman 等<sup>[13]</sup>对粉煤灰进行 XAFS 测试也认为其中的砷以砷酸盐形式存在, 且至少有 2 种形态: 铝硅酸盐和正砷酸钙. 由此可见, 粉煤灰中的砷主要以砷酸盐形式存在.

高砷含量严重制约着以褐煤粉煤灰为原料制备高附加值粉煤灰产品的推广和应用, 亟需开展褐煤粉煤灰中砷的脱除研究. 本工作针对内蒙某电厂的典型褐煤粉煤灰, 基于其中砷的特定赋存状态, 并考虑硝酸盐的可溶性及其对深度脱砷影响较小的特点, 设计硝酸酸法脱除重金属砷工艺, 考察了 pH 值、反应温度和时间等对砷脱除率的影响, 并跟踪监测了脱砷工艺中常量元素的损失, 最终确定了最优的脱砷工艺.

## 2 实验

### 2.1 材料与试剂

粉煤灰为内蒙某电厂产生的褐煤粉煤灰,  $\text{HNO}_3$ (分析纯, 北京化工厂), 去离子水由 Millipore 纯水仪(密理

博中国有限公司, 电阻高于  $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ )制备, 分析用标样(北京矿冶研究总院).

### 2.2 实验设备与分析仪器

实验设备: JXF-12-200 型均相反应器和热水罐(烟台松岭化工设备有限公司), 利用均相反应器控制环境温度并保证粉煤灰和硝酸溶液充分混合, 其示意图如图 1 所示.

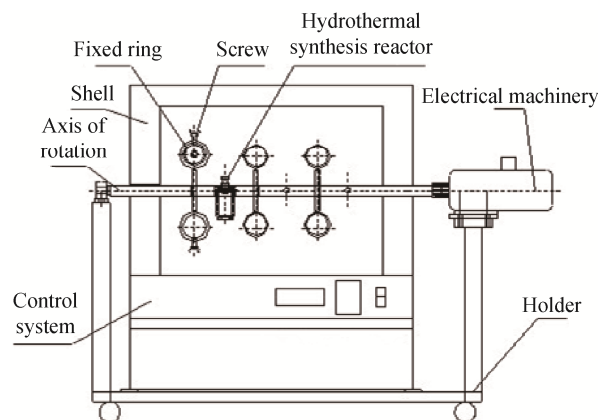


图1 均相反应器示意图

Fig.1 Schematic diagram of homogeneous reactor device

用 Optima 7300V 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, 珀金埃尔默股份有限公司)测定样品中元素含量, 用 Empyrean 型 X 射线衍射仪(XRD, 荷兰 PANalytical 公司)分析样品的成分, 用 SM-7610F 型热场发射扫描电子显微镜(SEM, 日本电子株式会社北京事务所)表征样品形貌.

### 2.3 实验方法

配制 pH 值分别为 0, 1, 2, 3, 4 和 5 的硝酸稀溶液, 与粉煤灰按液固质量比  $L/S=4$  在热水罐中混合后放入均相反应器中, 设定转速为 25 r/min, 在一定温度下达到预定反应时间后取出, 冷却过滤, 检测滤液; 滤饼经洗涤后放入  $105^\circ\text{C}$  烘箱内烘干 12 h, 固相经超声辅助消解程序<sup>[14]</sup>消解后, 由 ICP-OES 测定并计算得固相中砷含量和滤液中常量元素含量, 实验流程如图 2 所示.

粉煤灰中砷脱除率  $R(\%)$  和常量元素的溶损率  $L(\%)$  分别由下式计算:

$$R = \left( 1 - \frac{cV_0 \times 1000}{mM} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

$$L = \left( \frac{cV_0 \times 1000}{mM} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $c$  为所测元素的浓度( $\text{mg/L}$ ),  $V_0$  为所测液体的体积(L),  $m$  为样品的质量(g),  $M$  为所测元素在样品中的含量( $\text{mg/kg}$ ).

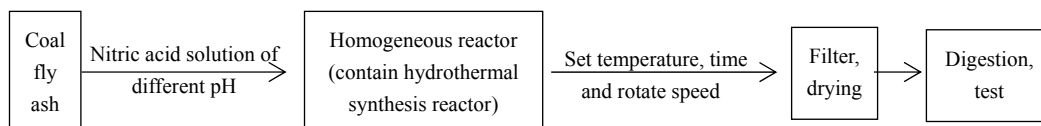


图 2 实验流程示意图

Fig.2 The diagram of experimental flow

### 3 结果与讨论

#### 3.1 粉煤灰的特性分析

所用褐煤粉煤灰的主要化学成分见表 1。可知,该粉煤灰主要成分为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 还含少量的  $\text{CaO}$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等。

表 1 褐煤粉煤灰的化学组成

Table 1 Chemical composition of lignite fly ash

Component	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$
Content/wt%	57.09	21.39	6.00	5.85	3.39	2.13	1.48	0.96

表 2 为粉煤灰中 5 种主要重金属元素的含量及 GB 8173-87 农用粉煤灰中污染物控制标准(粉煤灰所在地农用土壤  $\text{pH}=6.84$ )<sup>[15]</sup>。可以看出,该煤灰中砷含量高

达  $91.74 \text{ mg/kg}$ , 高于标准, 因此对其进行脱砷处理十分必要。

表 2 褐煤粉煤灰的主要重金属含量及国家标准

Table 2 Main heavy metal content of fly ash and standard

Element	Hg	Pb	Cr	Cd	As
Content/ Fly ash	0.7791	37.14	313.4	0.7586	91.74
(mg/kg) Standard <sup>[15]</sup>	No <sup>1)</sup>	500	500	10	75

Note: 1) The standard does not make a request for Hg element.

图 3 为煤灰的 XRD 谱及 SEM 照片。由 XRD 谱可知, 粉煤灰的主要结晶相为石英, 还有少量莫来石, 在  $2\theta=20^\circ\sim 30^\circ$  处的鼓包凸起表明粉煤灰中含一定量的高活性非晶成分, 在酸浸过程中需注意其溶解损失。由 SEM 照片可以看出, 粉煤灰主要呈大小不一的玻璃微球, 同时伴有少量的不规则物质。

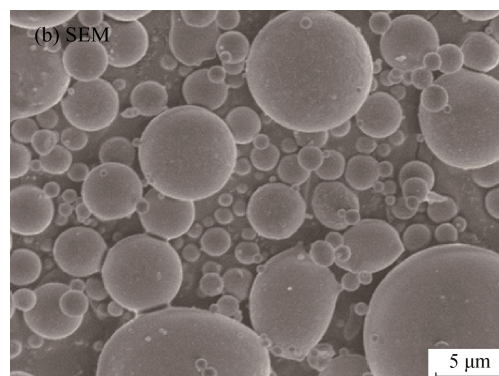
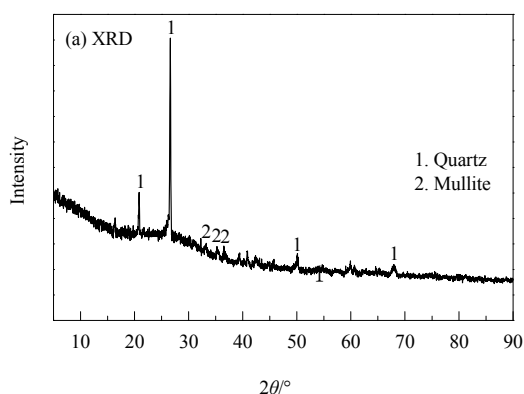


图 3 褐煤粉煤灰的 XRD 谱和 SEM 照片

Fig.3 XRD pattern and SEM image of lignite fly ash

#### 3.2 pH 值对脱砷效果的影响

在温度  $20^\circ\text{C}$ 、脱砷时间  $1 \text{ h}$ 、液固质量比  $L/S=4$  的条件下, 考察 pH 值对脱砷效果的影响, 结果如图 4 所示。可以看出, 随 pH 值升高, 煤灰中砷脱除率逐渐降低, 这是由于  $\text{HNO}_3$  与粉煤灰中的砷酸盐发生反应, 将其中的砷释放到溶液中, 并以砷酸根形式存在。因此, 所用硝酸溶液 pH 越低, 脱砷效果越好。但粉煤灰中  $\text{Ca}$  和  $\text{Mg}$  溶损会造成粉煤灰中常量元素大量损失, 综合比较选  $\text{pH}=1$  为最优的脱砷 pH 值。

#### 3.3 反应温度对脱砷效果的影响

在  $\text{HNO}_3$  溶液  $\text{pH}=1$ 、液固质量比  $L/S=4$ 、反应时间  $t=1 \text{ h}$  的条件下, 考察反应温度对硝酸脱砷效果的影响,

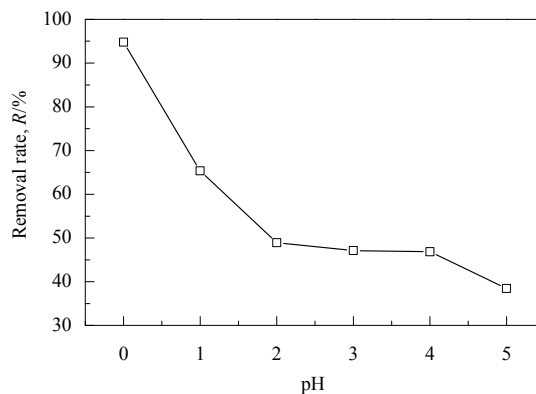


图 4 pH 值对砷脱除率的影响

Fig.4 Effect of pH value on removal rate of arsenic

结果如图5所示. 可以看出, 随温度升高, 煤灰中砷脱除率逐渐降低, 这可能是由溶出反应的热力学性质决定的. 粉煤灰除含  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量也较高, 因此作为粉煤灰中主要赋存状态的砷酸盐也应以砷酸钙、砷酸铁和砷酸钠等形式为主, 与稀硝酸反应式如下:

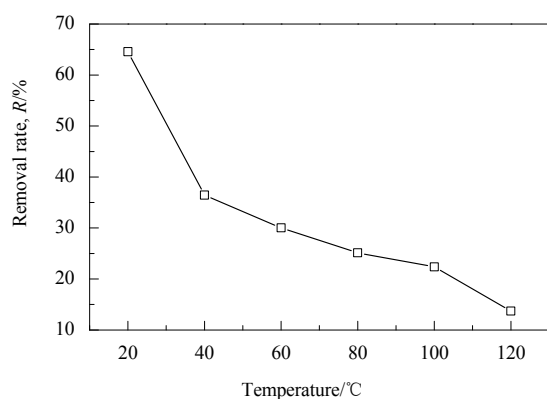
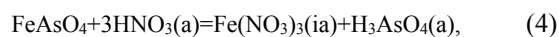
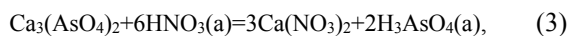


图5 反应温度对砷脱除率的影响

Fig.5 Effect of reaction temperature on removal rate of arsenic

利用 HSC6.0 软件计算上述反应的标准吉布斯自由能变  $\Delta G^\theta$ , 结果如图6所示. 可以看出, 20°C 时3个反应的  $\Delta G^\theta$  均小于0, 反应均可自发进行; 随温度升高,  $\Delta G^\theta$  均增大, 表明温度升高不利于反应进行, 这可能是粉煤灰中砷脱除率随温度升高而降低的原因. 最优反应温度为 20°C.

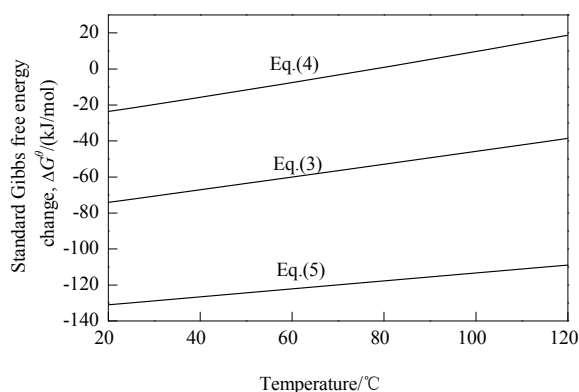


图6 几种砷酸盐与硝酸反应的标准吉布斯自由能变与温度的关系

Fig.6 Relationship of standard Gibbs free energy change with temperature in the reaction of arsenate and nitric acid

### 3.4 反应时间对脱砷效果的影响

在硝酸溶液 pH=1、液固质量比 L/S=4、反应温度 20°C 的条件下, 考察反应时间对脱砷效果的影响, 结果如图7所示. 可以看出, 粉煤灰中砷脱除率随时间延长而波动. 吕志敏等<sup>[16]</sup>认为表面吸附-解析、pH 值、氧化还原条件及固-液界面离子交换等多重因素决定着飞灰中重金属的溶出; 朱法华等<sup>[17]</sup>指出赋存状态、同离子效应、盐效应及酸效应等均对污染物质溶出有一定影响; 此外, 许多学者都曾以粉煤灰为吸附材料处理废水中的重金属. 这是由于粉煤灰具有一定的表面积, 对溶液中的重金属离子有吸附作用; 另一方面, 随脱砷时间延长, 溶液 pH 值也发生变化, 不同 pH 下砷酸根在溶液中的存在形式也不同. 因此, 粉煤灰对砷的吸附-解吸、溶液 pH 值波动引起存在形式变化等都可能是导致实际砷脱除率随时间波动的主要原因.

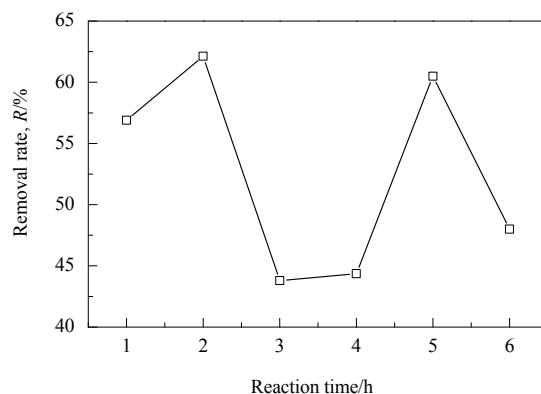


图7 反应时间对砷脱除率的影响

Fig.7 Effect of reaction time on removal rate of arsenic

### 3.5 粉煤灰中主要元素的溶损率

煤灰中砷被脱除的同时, 常量元素也可能发生溶解损失. 通过测定溶出滤液中常量元素的含量可得其溶损

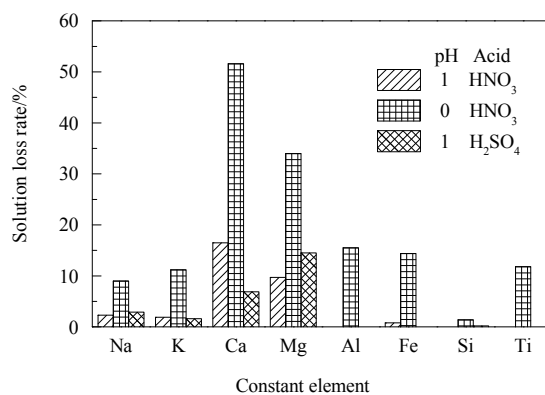


图8 常量元素的溶损率

Fig.8 Solution loss rate of constant elements



率. 图 8 为温度 20 ℃ 及时间 1 h 条件下不同 pH 值和不同酸时常量元素的溶损率. 可以看出, HNO<sub>3</sub> 溶液 pH=0 时粉煤灰中常量元素的溶出率远大于 pH=1 的 HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 其中 Ca 和 Mg 的损失率分别为 51.8% 和 34.0%; pH=1 的 HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液对常量元素的溶出率相差不多, 但对 Ca 的脱除率差别较大, 分别为 16.5% 和 6.9%.

在 pH=1、反应温度 20 ℃、反应时间 1 h、液固质量比 L/S=4 条件下 HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 对粉煤灰中砷的脱除率分别为 66.34% 与 48.78%. 可见相同条件下, HNO<sub>3</sub> 对粉煤灰中砷的脱除效果优于 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

对比图 3(b) 和图 9 可知, 经 pH=1 的硝酸处理后, 煤灰形貌并未发生太大变化, 仍以球形为主, 但其表面更粗糙, 可能是部分元素溶出所致.

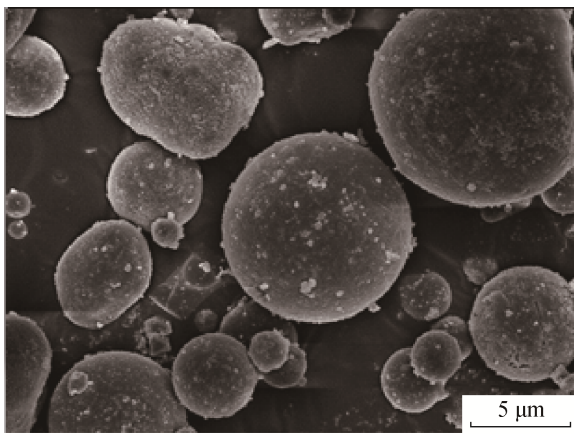


图 9 pH=1 的硝酸处理后褐煤灰的 SEM 照片  
Fig.9 SEM image of lignite fly ash treated by nitric acid of pH=1

对比表 1 和表 3 可知, 经 pH=1 的硝酸溶液处理过的粉煤灰的化学组成变化不大, 由于其中砷含量降低, 对环境的危害性显著减小, 有利于其高值化利用.

表 3 pH=1 的硝酸处理后煤灰的化学组成  
Table 3 Chemical composition of coal ash treated by nitric acid of pH=1

Component	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Content/wt%	57.00	21.26	5.01	5.80	3.31	1.92	1.45	0.96

4 结 论

采用酸溶法脱除粉煤灰中的砷, 考察了 pH、温度、时间对粉煤灰中砷脱除率的影响, 分析了粉煤灰中常量元素的溶损率, 比较了不同酸的脱砷效果, 得到以下结论:

- (1) HNO<sub>3</sub> 脱除粉煤灰中的砷时, 脱除率随 pH 值增大而减小, 随温度升高而降低, 随时间增长上下波动.
- (2) HNO<sub>3</sub> 溶液 pH=0 时, 粉煤灰中常量元素大量损

失, 远超过 pH=1 的 HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液; 相同条件下 HNO<sub>3</sub> 溶液对粉煤灰中砷的脱除率高于 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

(3) 综合考虑脱砷率、常量元素溶损率和酸用量等, 硝酸溶液脱除粉煤灰中砷的较优条件为 pH=1, 反应时间 1 h, 反应温度 20 ℃.

参考文献

[1] 王家伟, 刘钊, 孙喆. 研究燃煤过程中重金属污染物的迁移规律的重要性 [J]. 科技创新导报, 2015, 12(11): 93.  
Wang J W, Liu Z, Sun Z, et al. The importance of the study on the migration of heavy metal pollutants in the process of coal combustion [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(11): 93.

[2] 王明仕, 郑宝山, 胡军, 等. 我国煤中砷含量及分布 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 344–348.  
Wang M S, Zheng B S, Hu J, et al. Distribution of arsenic in southwest coals [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 344–348.

[3] 刘慧敏, 王春波, 郭永成, 等. 高砷褐煤与低砷烟煤混燃砷的挥发特性及模型 [J]. 化工学报, 2016, 67(10): 4477–4484.  
Liu H M, Wang C B, Guo Y C, et al. Experimental and modeling study on arsenic volatilization during co-combustion of high arsenic lignite and low arsenic bituminous coal [J]. CIESC Journal, 2016, 67(10): 4477–4484.

[4] 蒋学先, 何贵香, 李旭光, 等. 高砷烟尘脱砷试验研究 [J]. 湿法冶金, 2010, 29(3): 199–202.  
Jiang X X, He G X, Li X G, et al. Experimental study on arsenic removal from high arsenic [J]. Hydrometallurgy of China, 2010, 29(3): 199–202.

[5] 易宇, 石靖, 田庆华, 等. 高砷烟尘氢氧化钠–硫化钠碱性浸出脱砷 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(3): 806–814.  
Yi Y, Shi J, Tian Q H, et al. Arsenic removal from high-arsenic dust by NaOH–Na<sub>2</sub>S alkaline leaching [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(3): 806–814.

[6] Kashiwakura S, Ohno H, Matsubae-Yokoyama K, et al. Removal of arsenic in coal fly ash by acid washing process using dilute H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solvent [J]. J. Hazard. Mater., 2010, 181(1): 419–425.

[7] 刘迎晖, 郑楚光, 游小清, 等. 燃煤过程中易挥发有毒痕量元素的相互作用 [J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(4): 243–247.  
Liu Y H, Zheng C G, You X Q, et al. Interaction between most volatile toxic trace element during coal combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(4): 243–247.

[8] Yan R, Gauthier D, Flamant G. Partitioning of trace elements in the flue gas from coal combustion [J]. Combust. Flame, 2001, 125(1): 942–954.

[9] Nurmesniemi H, Pöykiö R, Kuokkanen T, et al. Chemical sequential extraction of heavy metals and sulphur in bottom ash and in fly ash from a pulp and paper mill complex [J]. Waste Manage. Res., 2008, 26(4): 389–399.

[10] 苏华美. 煤及燃煤产物中砷的赋存形态和析出特征研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014: 28–30.  
Su H M. Research of geometrical shape and precipitation characteristics of arsenic coal and its burning product [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014: 28–30.

[11] Zielinski R A, Foster A L, Meeker G P, et al. Mode of occurrence of

- arsenic in feed coal and its derivative fly ash, black warrior basin, Alabama [J]. *Fuel*, 2007, 86(4): 560–572.
- [12] Shah P, Strezov V, Stevanov C, et al. Speciation of arsenic and selenium in coal combustion products [J]. *Energy Fuels*, 2007, 21(2): 506–512.
- [13] Huffman G P, Huggins F E, Shah N, et al. Speciation of arsenic and chromium in coal and combustion ash by XAFS spectroscopy [J]. *Fuel Process. Technol.*, 1994, 39(1/3): 47–62.
- [14] Ilander A, Väisänen A. The determination of trace element concentrations in fly ash samples using ultrasound-assisted digestion followed with inductively coupled plasma optical emission spectrometry [J]. *Ultrason. Sonochem.*, 2009, 16(6): 763–768.
- [15] 国家环境保护局. 农用粉煤灰中污染物控制标准: GB 8173-1987 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1988: 1–2.
- National Environmental Protection Agency. Control standards of pollutants in fly ash for agricultural use: GB 8173-1987 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1988: 1–2.
- [16] 吕志敏, 李仙粉, 任福民, 等. 综合利用电厂粉煤灰的重金属问题 [J]. *环境与可持续发展*, 2006, (4): 57–59.
- Lv Z M, Li X F, Ren F M, et al. Study of heavy metals for the comprehensive utilization of fly ash [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2006, (4): 57–59.
- [17] 朱法华, 张景荣, 荣鸿敏, 等. 粉煤灰中污染物质的淋溶释放模型 [J]. *环境科学学报*, 1996, 16(2): 203–210.
- Zhu F H, Zhang J R, Rong H M, et al. Leaching model of pollutants in fly ash [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996, 16(2): 203–210.