

# 超低排放燃煤电站湿法脱硫和湿式电除尘器中硒含量分布及形态演变

余学海<sup>1</sup>, 张翼<sup>1</sup>, 常林<sup>2</sup>, 顾永正<sup>3</sup>, 李增华<sup>2</sup>, 张帅<sup>1</sup>, 崔向峥<sup>2</sup>, 陈寅彪<sup>3</sup>, 赵永椿<sup>2</sup>

(1. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100018; 2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北武汉 430074;

3. 中国神华能源股份有限公司国华电力分公司, 北京 100025)

**摘要:**煤中硒在燃烧后释放到气相中,并吸附于气相中的细颗粒物上,可被燃煤电厂中的湿法脱硫系统(WFGD)和湿式电除尘(WESP)系统捕获,明确Se在湿法脱硫系统及湿式电除尘系统中的迁移规律和形态分布情况至关重要。基于氢化物发生-原子荧光光谱(HG-AFS)方法研究了湿法脱硫系统及湿式电除尘系统中关键位置处的硒含量分布和形态演变规律。研究发现,燃煤烟气中的硒可被湿法脱硫系统脱除,捕获后的硒在脱硫塔内固相和液相中的含量分别为1.07 μg/g和0.123 mg/L,在强制氧化作用下,超过80%的四价硒被氧化为六价硒。浆液经旋流分离器分离后,大部分硒转移到废水处理中。常规废水处理过程只对四价硒具有较高的脱除效率,但废水中六价硒占比超过77%,使传统三联箱废水处理工艺无法实现硒的高效脱除,造成现有燃煤电站废水中硒难以脱除。湿式电除尘系统冲灰水固相中硒富集明显,含量达13.9 μg/g。液相中硒含量为0.0016 mg/L,其中四价硒和六价硒占比分别为34.35%和65.65%。加装湿式电除尘可将难以脱除的气相硒转移到固相灰中,实现燃煤烟气中气相硒的深度脱除,估算机组全年湿式电除尘可脱除烟气中颗粒态硒2.9 kg。

**关键词:**超低排放;燃煤电站;湿法脱硫;湿式电除尘;硒

中图分类号:TK229.6 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)03-0100-05

## Se partitioning and species in WFGD and WESP system of the ultra-low emission coal fired power plant

YU Xuehai<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, CHANG Lin<sup>2</sup>, GU Yongzheng<sup>3</sup>, LI Zenghua<sup>2</sup>, ZHANG Shuai<sup>1</sup>,

CUI Xiangzheng<sup>2</sup>, CHEN Yinbiao<sup>3</sup>, ZHAO Yongchun<sup>2</sup>

(1. Shenhua Guohua(Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100018, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Guohua Electric Power Branch, China Shenhua Energy Co., Ltd., Beijing 100025, China)

**Abstract:** Se is released to gas phase and combines with fine particles in flue gas after coal combustion which can be captured by the wet desulfurization(WFGD) system and wet electrostatic precipitator(WESP) in flue gas, and it is important to determine the partitioning and species of Se in these systems. Based on hydride generation-atomic fluorescence spectrometry(HG-AFS), the partitioning and species of Se in the key locations of WFGD and WESP were studied. It is found that Se can be removed by WFGD system in flue gas. The concentration of Se in the solid fraction and liquid fraction of desulfurization tower slurry are 1.07 μg/g and 0.123 mg/L, respectively. Over 80% Se in the desulfurization tower is oxidized to Se(VI) under forced oxidation condition. After separated by a hydrocyclone, most Se is transported to effluent treatment process. The predominant Se species in the effluent treatment process is Se(VI), with the proportion exceeds 77%, which accounts for low efficiency in Se removal by traditional three-linked tank technique. Se exhibits a significant enrichment in solid fraction of the flush water from WESP whose concentration is 13.9 μg/g, while 0.0016 mg/L Se is determined in the liquid fraction

收稿日期:2019-04-25;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19042511

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0605104);华中科技大学学术前沿青年团队资助项目(2018QYTD05)

作者简介:余学海(1983—),男,四川宜宾人,高级工程师,博士,主要从事燃煤电厂污染物控制研究。E-mail:16850100@chnenergy.com.cn。通讯

作者:赵永椿(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事燃煤污染物形成和防治的理论和技术研究。E-mail: yczhao@hust.edu.cn

引用格式:余学海,张翼,常林,等.超低排放燃煤电站湿法脱硫和湿式电除尘器中硒含量分布及形态演变[J].洁净煤技术,2019,25(3):100-104.

YU Xuehai, ZHANG Yi, CHANG Lin, et al. Se partitioning and species in WFGD and WESP system of the ultra-low emission coal fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3): 100-104.



移动阅读

where proportions of Se(IV) and Se(VI) are 34.35% and 65.65%, respectively. WESP equipment achieves Se deep removal from flue gas, and transports this part of Se to the solid fraction of ash. It is calculated that with the help of WESP 2.9 kg/yr particle-bound Se is removed.

**Key words:** ultra-low emission; coal fired power plant; WFGD; WESP; Se

## 0 引言

硒作为一种非金属元素,是动植物体内所必需的营养元素。过量的硒不易吸收且具有毒性。在人类的各项生产活动中,硒或含硒物质会通过多种途径释放到环境中,对生态环境构成极大威胁。有报道指出燃煤电站是硒的主要排放源<sup>[1]</sup>。2014年,国家发改委、环境保护部、国家能源局联合出台《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》,要求燃煤电站烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>污染物的排放限值分别不高于10、35和50 mg/m<sup>3</sup>。目前大多数大型燃煤电厂对污染物控制设备(air pollution control devices, APCDs)进行了超低排放升级改造,一些燃煤电厂加装了湿式电除尘(wet electrostatic precipitator, WESP)以实现亚微米级细颗粒物的高效脱除。煤燃烧过程释放的硒在燃煤烟气中主要以Se<sup>0</sup>、SeO<sub>2</sub>和飞灰结合态SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的形式存在<sup>[2]</sup>。燃煤烟气中的Se可被现有的APCDs捕获脱除。如静电除尘器(electrostatic precipitators, ESP)可高效脱除燃煤烟气中的飞灰颗粒,效率可达99%<sup>[1]</sup>,同时可实现飞灰结合态Se的协同脱除;湿法烟气脱硫(wet flue gas desulfurization, WFGD)系统可有效减少烟气中SO<sub>2</sub>的排放,同时对烟气中Se<sup>0</sup>、SeO<sub>2</sub>和少量ESP逃逸的飞灰结合态SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>进行捕获。由于WFGD系统内化学成分复杂,导致捕获后的Se在WFGD内以多种形态存在,很难从WFGD系统内液相中脱除<sup>[3]</sup>。

Senior等<sup>[4]</sup>研究了常规燃煤电站WFGD系统对Se的脱除效果,发现WFGD系统对Se的平均脱除效率为61%。Se进入WFGD系统后,在复杂运行参数的影响下经历复杂反应,在系统中的存在形式多样,Petrov等<sup>[5]</sup>利用阴离子交换色谱和电感耦合等离子体质谱联用技术,在脱硫系统液相中分离出13种Se化合物,最终只鉴定出硒氰酸盐(SeCN<sup>-</sup>)和硫代硒酸盐(SeSO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)2种Se盐。对超低排放电厂的WESP灰及石膏进行逐级化学提取分析发现,对环境造成影响的潜在组分中,Se的占比达60%和37%<sup>[6]</sup>。朱振武等<sup>[7]</sup>研究了WFGD系统内Se在废水处理过程中的行为,发现Se较难

从液相中脱除,主要赋存在液相中。国内对于Se在超低排放电厂APCDs的研究结果有限,尤其是经过超低排放改造后Se在WFGD和WESP中的分布和演变规律尚不清楚。为此,本文主要研究超低排放改造后Se在WFGD和WESP中的分布赋存规律,探究Se的迁移规律和形态分布,期为燃煤电厂超低排放改造后Se的排放控制对策提供理论依据。

## 1 试验

### 1.1 测试方法

目前针对Se形态的研究方法主要有氢化物-原子吸收光谱法(HG-AAS)<sup>[8]</sup>、色谱或毛细电泳与等离子体质谱(ICP-MS)联用技术<sup>[9-10]</sup>和氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)<sup>[11-14]</sup>等。HG-AAS法测定硒的线性范围较窄,不满足实际要求;色谱或毛细电泳ICP-MS法操作步骤复杂。本文采用HG-AFS法,操作简易,灵敏度高。HG-AFS法原理是利用硼氢化钠(NaBH<sub>4</sub>)与Se(IV)反应形成氢化物,由高纯氦气携带入检测室,直接测量Se(IV)含量,同时用盐酸将Se(VI)还原为Se(IV)测得Se总量,间接得到Se(VI)含量。测量仪器为北京海光仪器公司原子荧光光度计(AFS-230E),试验试剂均为分析级,试验溶液用去离子水配置。

### 1.2 试验样品

样品采集于某厂4×300 MW超低排放机组,该燃煤机组APCD主要有SCR、ESP、WFGD及WESP。WFGD样品及WESP样品采集位置如图1所示。WFGD系统内采集各关键位置样品,包括脱硫石灰浆液、扰动泵处浆液、排出泵处浆液、旋流分离器处浆液、滤液水箱浆液及处理后排水;WESP系统采样位置为底部处灰水。所采集样品为固液两相混合样,利用高速离心机将固液两相分离后取上层清液,分离转速为2 000 r/min,分离时间为15 min。分离后的液相样品用0.45 μm水性滤膜过滤,分离后的固相样品在80℃烘干12 h后待测。固体利用微波消解仪进行消解,消解体系组分体积比为HNO<sub>3</sub>:HCl:HF=3:1:1,消解后样品用22 μm水性滤膜过滤后测量。

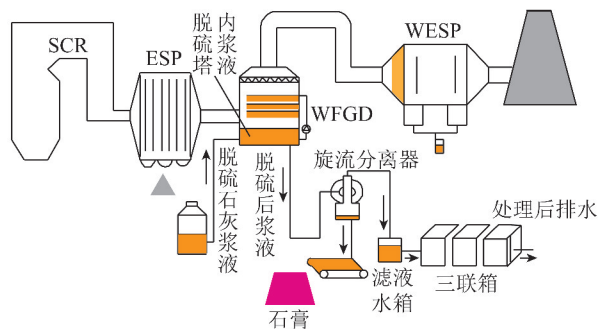


图1 WFGD 样品采集点示意

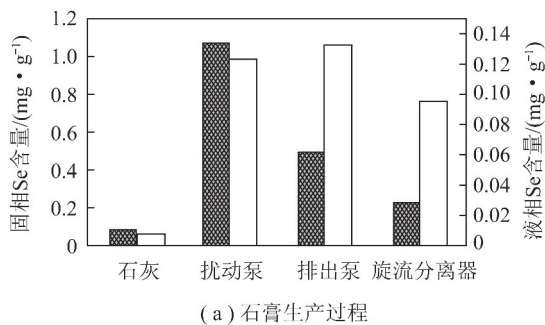
Fig. 1 Sampling positions in WFGD system

## 2 试验结果与讨论

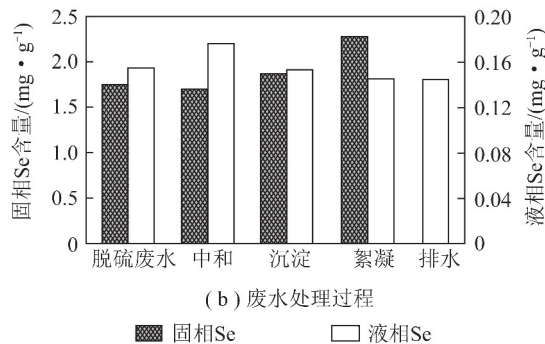
### 2.1 湿法脱硫系统中 Se 的分布

对 WFGD 系统中石膏生产过程及废水处理过程中关键位置处样品进行固液两相分析以及固、液相产物中 Se 含量,如图 2 所示。可以看到,石灰浆液固相和液相中 Se 的含量很低,仅为  $0.007 \mu\text{g/g}$  和  $0.083 \text{ mg/L}$ ,脱硫酸塔内(扰动泵处)固相和液相中 Se 含量分别为  $1.07 \mu\text{g/g}$  和  $0.123 \text{ mg/L}$ ,脱硫酸后浆液(排出泵处)中固相和液相中 Se 含量为  $0.493 \mu\text{g/g}$  和  $0.132 \text{ mg/L}$ ,说明石灰浆液并不会携带大量 Se 进入 WFGD 系统。同时,脱硫酸塔内固相中 Se 含量增加,说明浆液的淋洗作用对烟气中逃逸的飞灰结合态 Se 及气相中的 Se 有脱除作用。但由于脱硫酸塔内  $\text{pH} \approx 5$ ,固相中的 Se 存在浸出行为,导致脱硫酸后浆液的液相中 Se 含量增加。由旋流分离器处 Se 含量结果可知,经旋流分离器分离后,部分 Se 被输送到废水处理系统中(溢流),导致分离后的底流浆液固相和液相中的 Se 含量分别为  $0.226 \mu\text{g/g}$  和  $0.095 \text{ mg/L}$ 。这是由于旋流分离器分离出的溢流浆液具有更细的颗粒粒径,对液相中 Se 的吸附效果较强,从而使液相中的 Se 含量降低。

目前脱硫酸废水的处理主要采用“三联箱”工艺,分为中和箱、沉淀箱和絮凝箱。在中和箱中添加熟石灰将浆液 pH 值调至  $9 \sim 10$ ,在沉淀箱使废水中重金属离子生成氢氧化物沉淀,在絮凝箱中加入高分子  $\text{FeClSO}_4$  絮凝剂,将沉淀物进一步絮凝增大。由图 2 可见,废水处理过程中 Se 在固相中存在富集现象,比石膏生产过程中 Se 的固相含量更高,同时废水处理过程中液相 Se 的含量降低,这是由于部分液相中的 Se 被沉淀捕获转移至固相中。但大部分 Se 仍赋存于液相中,朱振武等<sup>[7]</sup>研究表明,经废水处理,超过 50% 的 Se 会残留在液相中,并不会随沉淀转移到固相污泥中,其处理后的排水中 Se 含量约为  $0.057 \text{ mg/L}$ 。而本文可能由于废水处理前浓度



(a) 石膏生产过程



(b) 废水处理过程

固相Se 液相Se

图2 石膏生产过程和废水处理过程中 Se 在固相和液相中的分布

Fig. 2 Se concentration in solid and liquid of gypsum production and effluent treatment

相对较高,经三联箱系统处理后,最终排水的 Se 含量为  $0.144 \text{ mg/L}$ ,低于国内废水排放标准限值,略高于目前国际最严格的排放标准 ( $0.1 \text{ mg/L}$ )<sup>[15]</sup>,还有进一步降低的空间。

### 2.2 湿法脱硫系统中 Se 的形态

国内对 Se 在 WFGD 内的分布报道相对较少,对 WFGD 系统内 Se 形态的研究更少。由 2.1 节可知,虽然脱硫系统废水处理后可脱除部分液相 Se,但脱除效率不高。湿法脱硫系统中的废水处理主要方式为絮凝沉淀法,其依靠引入  $\text{Fe}^{3+}$  使液相中的沉淀带正电荷,随后通过静电吸附作用捕获液相中的亚硒酸盐;与  $\text{SO}_4^{2-}$  相比, $\text{Cl}^-$  对亚硒酸根的竞争吸附能力更弱,导致  $\text{FeCl}_3$  对硒的脱除效果优于  $\text{FeSO}_4$ <sup>[16]</sup>。而 Se 在液相中的反应复杂,在液相中有多种存在形式<sup>[2]</sup>,Se(IV) 的毒性相对较强,可通过微生物将其还原为毒性较低的单质硒<sup>[17]</sup>。另外,可利用铁的氧化物或铁的氢氧化物通过共沉淀法脱除<sup>[18]</sup>;而 Se(VI) 需要利用其他方法脱除<sup>[5,19]</sup>。因此,明确 WFGD 系统液相中 Se 的形态分布至关重要。利用 HG-AFS 法对 WFGD 系统内关键位置液相产物中 Se 的形态进行分析,Se(IV) 和 Se(VI) 的质量分数如图 3 所示。在石膏生产过程中,石灰浆液液相中几乎全部为 Se(IV),在脱硫酸塔内经强制氧化作用后,超过 80% 的 Se(IV) 被氧化为 Se(VI)。



脱硫浆液与  $\text{SO}_2$  充分反应后,  $\text{Se}(\text{VI})$  比例进一步提高, 占比达 85%。废水处理过程中,  $\text{Se}(\text{IV})$  和  $\text{Se}(\text{VI})$  比例相对稳定,  $\text{Se}(\text{VI})$  占比 77% 以上,  $\text{Se}(\text{VI})$  含量较高, 导致利用铁的氧化物或氢氧化物通过共沉淀方法无法实现液相中  $\text{Se}$  的高效脱除。

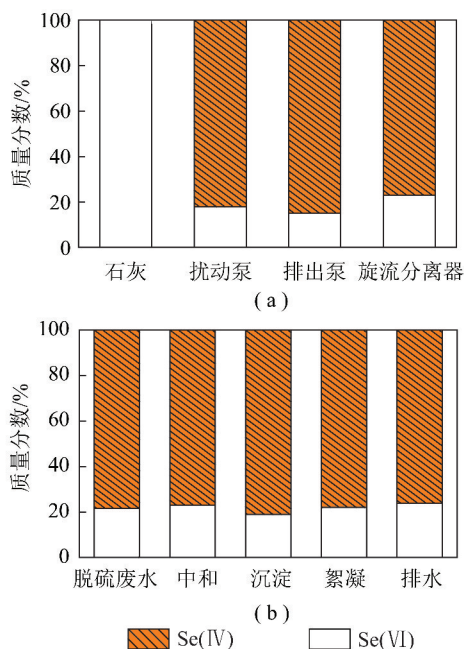


图3 石膏生产过程和废水处理过程中  $\text{Se}$  在液相中的形态分布

Fig. 3 Se concentration in the liquid of gypsum production and effluent treatment

### 2.3 湿式电除尘器中 $\text{Se}$ 含量及形态分布

WESP 利用极板间的高压电场使通过的含尘烟气电离并荷电, 同时依靠冲灰水收集极板上的细颗粒, 高效脱除亚微米级细颗粒物。对冲灰水中固相和液相产物中的  $\text{Se}$  含量进行分析, 固相产物中  $\text{Se}$  含量很高, 达  $13.9 \mu\text{g}/\text{g}$ , 远高于 WFGD 系统内的固相含量 ( $< 2.5 \mu\text{g}/\text{g}$ ), 说明从上游 APCD 逃逸的细颗粒物中,  $\text{Se}$  具有很强的富集性<sup>[3]</sup>。液相中的  $\text{Se}$  含量仅为  $0.0016 \text{ mg}/\text{L}$ , 与 WFGD 系统固液相产物相比,  $\text{Se}$  在 WESP 中存在固相向液相中的转移行为, WESP 冲灰水液相中低含量  $\text{Se}$  得益于 WESP 系统内的碱性环境。WESP 灰水中  $\text{Se}(\text{VI})$  占主导地位, 约占硒含量的 65.65%,  $\text{Se}(\text{IV})$  占硒含量的 34.35%。WESP 液相中  $\text{Se}(\text{IV})$  占比相较于 WFGD 内更高, 一方面与 WESP 内的碱性环境有关, 有研究表明,  $\text{Se}$  价态的分布比例可能很大程度上依赖于液相 pH 值<sup>[20]</sup>; 另外由于 WESP 内  $\text{O}_2$  含量通常低于 10%, 同时烟气流速过快, 导致低价态  $\text{Se}$  氧化反应时间有限; 而且由于燃煤电厂飞灰中  $\text{Se}(\text{IV})$  和  $\text{Se}(\text{VI})$  并存, 其中大部分为  $\text{Se}(\text{IV})$ <sup>[21]</sup>, 这可能

是导致 WESP 灰水中  $\text{Se}(\text{IV})$  比例较高的原因。

WESP 对燃煤烟气中的细颗粒进行捕获脱除, 在常规燃煤电厂, 细颗粒物从 ESP 及 WFGD 逃逸释放到大气中,  $\text{Se}$  在 WESP 脱除的细颗粒物上富集明显。为评估超低排放改造后 WESP 对  $\text{Se}$  的脱除效果, 粗略估算配备 WESP 后, 在常规燃煤电厂 APCDs 基础上对燃煤烟气中的  $\text{Se}$  实现进一步深度脱除的贡献。WESP 可对燃煤烟气中的  $\text{Se}$  实现深度脱除, 使难以脱除的气相中  $\text{Se}$  转移到固相灰中, 加装 WESP 后  $\text{Se}$  的脱除效率可增至 98.22%<sup>[22]</sup>。另外, 根据刘含笑等<sup>[23]</sup> 对国内 10 余个电厂 WESP 排放特性进行现场评估的结果, WESP 出口处颗粒物浓度在  $0.43 \sim 7.20 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 除尘效率在 72.4% ~ 93.8%。取 WESP 出口颗粒物浓度为  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 除尘效率为 80%, 烟气流量为  $120 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ , 粗略估算全年 WESP 脱除烟气中颗粒态结合态  $\text{Se}$  的质量  $A_{\text{em}}$  为  $2.9 \text{ kg}$  (式(1))。

$$A_{\text{em}} = \frac{\mu C_{\text{out}} C_{\text{Se}}}{1 - \mu} Q_{\text{gas}} T \quad (1)$$

式中,  $A_{\text{em}}$  为机组年平均 WESP 对颗粒态  $\text{Se}$  的脱除量;  $\mu$  为 WESP 除尘效率;  $C_{\text{out}}$  为 WESP 出口颗粒物浓度;  $C_{\text{Se}}$  为 WESP 灰中  $\text{Se}$  浓度;  $Q_{\text{gas}}$  为机组每小时烟气流。

### 3 结 论

1) WFGD 系统石灰浆液中  $\text{Se}$  几乎全部为毒性较强的  $\text{Se}(\text{IV})$ , 在 WFGD 强制氧化的作用下, 其余位置大部分为  $\text{Se}(\text{VI})$ , 占比超过 77%。

2) 废水处理过程中  $\text{Se}(\text{VI})$  比例较高导致传统三联箱工艺无法实现废水中  $\text{Se}$  高效脱除。

3)  $\text{Se}(\text{IV})$  氧化反应不充分和 WESP 内碱性环境造成 WESP 中  $\text{Se}(\text{VI})$  和  $\text{Se}(\text{IV})$  比例分别为 65.65% 和 34.35%, WESP 对  $\text{Se}$  脱除效果较好。

### 参考文献 (References):

- [1] ZHONG L, CAO Y, LI W, et al. Selenium speciation in flue desulfurization residues [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23: 171-176.
- [2] CORDOBA P. Partitioning and speciation of selenium in wet limestone flue gas desulfurisation systems: A review [J]. Fuel, 2017, 202: 184-195.
- [3] ZHENG C, WANG L, ZHANG Y, et al. Partitioning of hazardous trace elements among air pollution control devices in ultra-low-emission coal-fired power plants [J]. Energy & Fuels, 2017, 31: 6334-6344.
- [4] SENIOR C L, TYREE C A, MEEKS N D. Cushing, selenium partitioning and removal across a wet FGD scrubber at a coal-fired

- power plant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 14376-14382.
- [5] PETROV P K, CHARTERS J W, WALLSCHLAGER D. Identification and determination of selenosulfate and selenocyanate in flue gas desulfurization waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 1716-1723.
- [6] WANG L, ZHENG C H, ZHANG Y X, et al. Speciation characteristics and mobility of trace elements across ultralow emission air pollution control devices[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31: 13963-13971.
- [7] 朱振武, 嵇玉群, 安忠义, 等. 湿法脱硫系统中痕量元素的分布[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(3): 330-335.  
ZHU Zhenwu, ZHUO Yuqun, AN Zhongyi, et al. Trace element distribution during wet flue gas desulphurization system[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(3): 330-335.
- [8] 姜建生, 黄淦泉, 钱沙华, 等. 交联壳聚糖在硒的形态分析中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 1999, 19(1): 75-77.  
JIANG Jiansheng, HUANG Jinquan, QIAN Shahua, et al. The application of crosslinked chitosan in speciation analysis of Selenium[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1999, 19(1): 75-77.
- [9] 黄娟, 任玉琴, 饶凤琴. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术测定饲料中7种砷形态化合物[J]. *中国饲料*, 2018(17): 81-85.  
HUANG Juan, REN Yuqin, RAO Fengqin. Determination of seven arsenic compounds in feed by high performance liquid chromatography-inductively coupled with plasma mass spectrometry[J]. *China Food*, 2018(17): 81-85.
- [10] VIROLAINEN S, HEINONEN J, PAATERO E. Selective recovery of germanium with N-methylglucamine functional resin from sulfate solutions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 104: 193-199.
- [11] 韩恒斌, 王卫东. 氢化物-无色散原子荧光法测定河水和废水中砷(III)、砷(V)、锑(III)、锑(V)、硒(IV)和硒(VI)[J]. *环境化学*, 1985, 4(2): 52-57.  
HAN Hengbin, WANG Weidong. Determination of As(III), As(V), Sb(III), Sb(V), Se(IV), and Se(VI) in the river and effluent by Hydride-free dispersion atomic fluorescence spectrometry[J]. *Environmental Chemistry*, 1985, 4(2): 52-57.
- [12] HE Y Z, MOREDA-PINEIRO J, CERVERA M L, et al. Direct determination of dissolved selenium(IV) and selenium(VI) in sea-water by continuous flow hydride generation atomic fluorescence spectrometry[J]. *J. Anal. Atom Spectrom*, 1998, 13: 289-293.
- [13] DOMENICO P A, SCHWARTZ F W. *Physical and chemical hydrogeology*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.
- [14] 尚德荣, 秦德元, 赵艳芳, 等. 高压液相色谱-氢化物发生-原子荧光光谱(HPLC-HG-AFS)联用技术检测水产品中硒的赋存形态[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(6): 1847-1852.
- SHANG Derong, QIN Deyuan, ZHAO Yanfang, et al. Selenium speciation analysis in aquatic products by high performance liquid chromatography-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2013, 4(6): 1847-1852.
- [15] Ministry of the Environment Government of Japan. National Effluent Standards: Items Related to the Protection of Human Health [EB/OL]. (2015-01-20). <https://www.env.go.jp/en/water/wq/n.es.html>.
- [16] 张胜寒, 孙晨皓, 陈玉强. 燃煤电厂脱硫废水中硒元素脱除技术研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(4): 1460-1468.  
ZHANG Shenghan, SUN Chenhao, CHEN Yuqiang. Research progress on selenium removal of FGD wastewater from coal-fired power plants[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(4): 1460-1468.
- [17] 梁晓红, 马志远, 李俊江, 等. 微生物还原亚硒酸盐影响因素研究进展[J]. *煤炭与化工*, 2016, 39(6): 34-43.  
LIANG Xiaohong, MA Zhiyuan, LI Junjiang, et al. Research Progress of affecting factors of biological reduction of selenite, Coal and Chemical Industry, 2016, 39(6): 34-43.
- [18] KASHIWAGI Y, KOKUFUTA E. Selective determination of selenite and selenate in wastewater by graphite furnace AAS after iron(III) hydroxide coprecipitation and reductive coprecipitation on palladium collector using hydrazinium sulfate[J]. *Analytical Sciences*, 2000, 16: 1215-1219.
- [19] THOMPSON A, PARKER D R, AMRHEIN C. Selenate partitioning in field-situated constructed wetland mesocosms[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20: 17-30.
- [20] TORRES J, PINTOS V, GONZATTO L, et al. Selenium chemical speciation in natural waters: Protonation and complexation behavior of selenite and selenate in the presence of environmentally relevant cations[J]. *Chemical Geology*, 2011, 288: 32-38.
- [21] SHAH P, STREZOV V, PRINCE K, et al. Speciation of As, Cr, Se and Hg under coal fired power station conditions[J]. *Fuel*, 2008, 87: 1859-1869.
- [22] CHANG L, YANG J P, ZHAO Y C, et al. Behavior and fate of As, Se, and Cd in an ultra-low emission coal-fired power plant[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 722-730.
- [23] 刘含笑, 姚宇平, 郦建国, 等. 燃煤电厂 WESP 颗粒物脱除机制及排放特征研究[J]. *中国电力*, 2017, 50(12): 178-184.  
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. Research of PM removal mechanism and emission characteristics for WESP in a coal-fired power plant, *Electric Power*, 2017, 50(12): 178-184.