

# 污水厂出水回用于污泥焚烧烟气的净化

刘 风<sup>1</sup> 马鲁铭<sup>2</sup>

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250000; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘 要** 开展了污水处理厂出水回用于污泥焚烧烟气净化的实验研究。生化出水净化吸收污泥焚烧烟气的效果与气水比、进气浓度、进水 pH、进水碱度和水温等因素有关。研究表明, 气水比 10:1, 进水 pH 为 7 条件下, 生化出水能够有效吸收污泥焚烧烟气中的各种污染物质, 出气中气体污染物低于《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2001) 的排放限值要求, 吸收后出水各指标均低于《污水综合排放标准》(GB8978-1996) 中污染物排放限值的要求。该工艺脱硫效率可达 90%, 具有系统简单可靠、以废治废、不产生二次污染等优点。

**关键词** 污泥焚烧 烟气净化 以废治废 污水处理厂

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)11-3899-06

## Reuse of effluent from sewage treatment plant for sludge incineration flue gas purification

Liu Feng<sup>1</sup> Ma Luming<sup>2</sup>

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250000, China;

2. School of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** The experimental study on reuse of effluent from municipal sewage treatment plant for sludge incineration flue gas purification was carried out. The removal efficiency of incineration flue gas is influenced by the gas-water ratio, inlet SO<sub>2</sub> concentration, water pH, water alkalinity and water temperature. The results showed that the pollutants in sludge incineration flue gas could be absorbed effectively when the gas-water ratio was 10:1, and the water pH was 7. The pollutants in emitted air are below the required emission limits of Standard for Pollution Control on Municipal Solid Waste Incineration (GB 18485-2001), and the pollutants in absorption solution are below the required emission limits of Integrated Wastewater Discharge Standard (GB8978-1996). In this process, the removal efficiency of SO<sub>2</sub> could reach 90%. This process has the advantage of simple system, waste control by waste, no secondary pollution etc.

**Key words** sludge incineration; flue gas purification; waste control by waste; sewage treatment plant

随着经济发展和人口增加, 我国城镇污水处理厂规模不断扩大, 污泥产量随之迅速增加。目前, 常用的污泥处理处置技术主要有填埋、焚烧、土地利用(农用)<sup>[1-3]</sup>。由于土地资源紧张以及各种环境污染问题的限制, 在国内外, 特别是大城市中, 污泥农场所占比例出现了小幅度下降, 填埋所占比例则大幅度削减, 而焚烧所占比例出现大幅度提升, 并逐渐成为发达国家污泥处理的主要手段之一<sup>[4-6]</sup>。

污泥焚烧烟气中含有 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、HCl、重金属和二恶英等大量有害物质, 如果不进行合理的处理, 将会对环境造成严重的二次污染<sup>[7-9]</sup>, 因此必须采取适当的方法净化吸收污泥焚烧烟气。其处理方法主要分为半干式喷雾干燥法、干式烟气净化和湿式烟

气洗涤法<sup>[10-12]</sup>。湿式洗涤法不仅可以去除 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 HCl 等污染物, 同时可以去除部分颗粒物和重金属, 是效率最高的烟气净化技术, 其中使用最多的石灰石/石灰-石膏湿法工艺是最成熟、运行最稳定的脱硫技术, 脱硫效率在 90% 以上<sup>[13]</sup>。污水处理厂的污水在生化处理过程中产生大量 CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 溶于水产生碳酸, 与污水中的 CaCO<sub>3</sub> 成分相作用, 而产生 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 从而使生化出水中有一定的

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”重大科技专项(2008ZX07011-004)

收稿日期: 2011-09-01; 修订日期: 2011-11-14

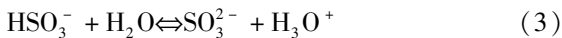
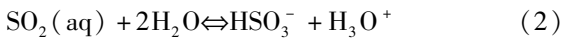
作者简介: 刘风(1988~), 女, 硕士研究生, 主要从事水处理理论与技术研究工作。E-mail: liufeng8811@hotmail.com

碱度。用污水处理厂生化处理出水净化吸收污泥焚烧烟气是一种以废治废的新方法,利用生化出水的碱度与烟气中的酸性气体反应,可达到废气净化和废水利用的目的。

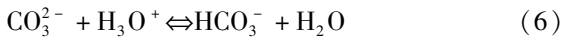
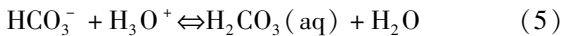
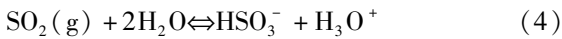
## 1 工艺原理

将污水处理厂出水用于净化吸收污泥焚烧烟气主要利用的是出水的碱度以及烟气中气体的酸性。主要反应(以二氧化硫吸收为例)如下:

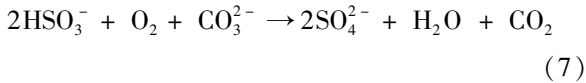
(1) 二氧化硫在水中的溶解与电离:



(2) 生化出水中, 二氧化硫化学吸收的主要反应:



其中, 亚硫酸氢根在水溶液中不稳定, 能与氧气作用生成硫酸根:



## 2 工艺流程

实验工艺流程如图 1 所示。

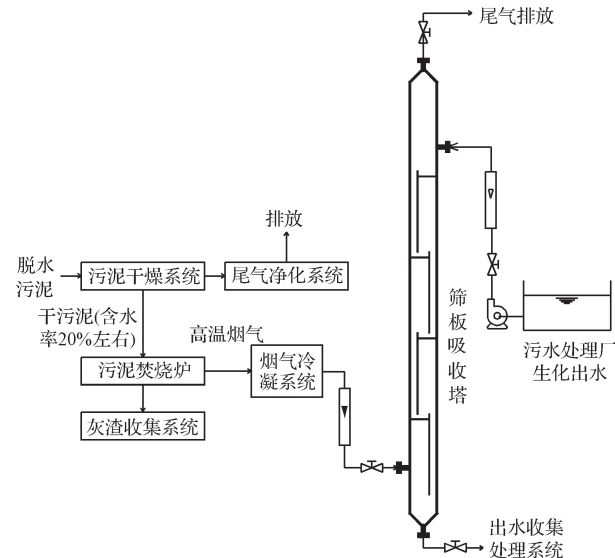


图 1 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of treatment process

本实验所用污泥为某污水处理厂脱水污泥, 含水率 80% 左右。在 103 ~ 105℃ 下, 将脱水污泥干燥成为含水率 20% 左右的干污泥。

本实验所用水源为污水处理厂生化处理出水, pH = 7.0。

含水率 20% 的干污泥进入温度 > 850℃ 的污泥焚烧炉进行焚烧, 焚烧烟气温度 > 300℃, 烟气经冷凝系统冷却至常温后从塔底进入吸收塔, 生化出水由水泵提升经流量计后从塔的顶部进入, 气液两相在塔内逆流接触, 完成污泥焚烧烟气的吸收过程。反应后吸收液收集后用于其他后续处理, 尾气则进行分流, 大部分尾气排放至室外远处, 而小部分尾气用作采样。

## 3 运行结果及分析

### 3.1 样品检测结果及分析

#### 3.1.1 污泥及灰渣样品检测

对于污泥及焚烧灰渣成分进行检测<sup>[14,15]</sup>, 检测结果如表 1 所示。

表 1 污泥样品及灰渣检测结果

Table 1 Detection results of sludge samples & incineration residue

检测项目	检测结果	
	干污泥	焚烧灰渣
干重 (kg)	4.5	2.3
碳 (%)	14.00	11.1
氮 (%)	2.05	0.47
硫 (%)	0.659	0.627
氯 (g/kg)	0.32	3.40
镉 (mg/kg)	3.68	<0.05
铅 (mg/kg)	182	194
铬 (mg/kg)	$2.68 \times 10^3$	$2.80 \times 10^3$
汞 (mg/kg)	1.35	0.0282
锌 (mg/kg)	$1.28 \times 10^3$	$1.41 \times 10^3$
铁 (mg/kg)	$3.5 \times 10^3$	$4.48 \times 10^3$
锰 (mg/kg)	316	432
有机物 (%)	47.0	—

经对污泥泥质的检测分析, 其中铬、锌等污染物指标超过《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284-1984) 中污染物排放限值的要求<sup>[16]</sup>, 不适于污泥农用, 可采用干化焚烧处理。20 kg 的脱水污泥经干化

焚烧处理后,灰渣重量约为 2.3 kg,重量减少百分比为 88.5%。

### 3.1.2 污泥焚烧烟气及处理后尾气样品检测结果

污泥焚烧烟气中含有大量有害物质。本实验采用筛板吸收塔作为吸收装置,采用污水处理厂生化出水作为水源,在气液比为 10:1、进水 pH 为 7 条件下对污泥焚烧烟气进行净化吸收,根据《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2001)中的规定对污泥焚烧烟气及处理后尾气进行了检测,结果如表 2 所示。

表 2 污泥焚烧烟气及处理后尾气检测结果

Table 2 Detection results of sludge incineration flue gas & effluent air (mg/m<sup>3</sup>)

检测项目	检测结果		标准值 <sup>[17]</sup>
	烟气	尾气	
SO <sub>2</sub>	2176	224	260
NO <sub>x</sub>	53.7	7.7	400
HCl	22.8	15.0	75
烟尘浓度	54.7	48.9	80
汞	$<3 \times 10^{-6}$	$<3 \times 10^{-6}$	0.2
镉	$4.00 \times 10^{-2}$	$3.10 \times 10^{-2}$	0.1
铅	0.236	0.194	1.6

实验结果表明,经对污泥焚烧烟气的检测分析,其中重金属等指标低于国家标准限值的要求,但是二氧化硫指标严重超标于《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2001)中大气污染物排放限值的要求,而在经过生化出水净化吸收后,处理后尾气各指标均低于排放限值的要求。

### 3.1.3 污水处理厂生化出水及吸收液样品检测结果

在上述工况下,对污水处理厂生化出水及吸收液进行测定,结果如表 3 所示。

实验结果表明,在所采用工况下,生化出水能够有效吸收污泥焚烧烟气中的各种污染物质,且吸收后出水各指标均低于《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)中污染物排放限值的要求<sup>[18]</sup>。

## 3.2 常规运行效果及分析

### 3.2.1 气水比对二氧化硫去除率的影响

实验条件:进水为污水处理厂生化处理出水,进气为污泥焚烧烟气,进水 pH = 7,进气温度为 30 ~ 35℃,气水比分别取 5、10、20、30 和 50。实验结果如图 2、图 3 和表 4 所示。

表 3 污水处理厂生化出水及吸收液检测结果  
Table 3 Detection results of effluent from sewage treatment plant & absorption solution

检测项目	检测结果	
	生化出水	吸收液
pH	7.05	7.46
碱度(mg/L)	45.05	96.97
氨氮(mg/L)	1.51	7.30
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	9.00	27.00
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0.01	0.0026
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	0.64	4.65
镉(mg/L)	<0.001	<0.001
铅(mg/L)	0.02	0.14
汞(mg/L)	<0.0001	0.006
铬(mg/L)	0.038	0.455
铜(mg/L)	0.06	0.422
锰(mg/L)	0.38	3.14

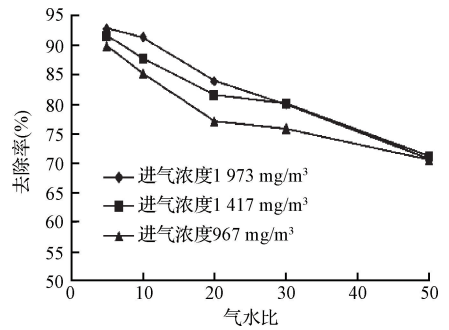


图 2 气水比对 SO<sub>2</sub> 去除率的影响

Fig. 2 Effect of gas-water ratio on SO<sub>2</sub> removal efficiency

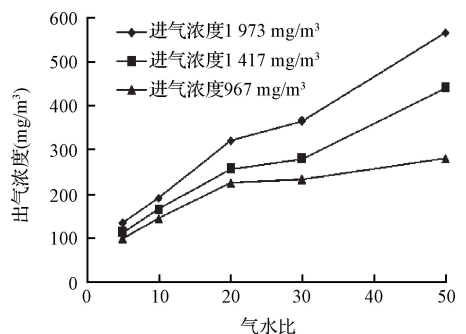


图 3 气水比对出气 SO<sub>2</sub> 浓度的影响

Fig. 3 Effect of gas-water ratio on SO<sub>2</sub> concentration of effluent gas

表4 各气水比条件下吸收液水质变化

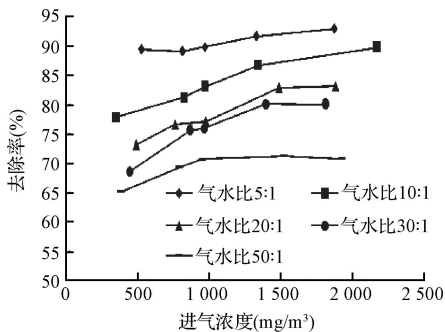
Table 4 Change of water quality with gas-water ratio

气水比	进气浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ )		pH	电导率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	氨氮 ( $\text{mg}/\text{L}$ )	TN ( $\text{mg}/\text{L}$ )	碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计, $\text{mg}/\text{L}$ )
	浓度	均值					
生化出水	—	—	7.05	724	1.57	19.98	45.05
5	1 872		7.19	758	6.18	36.63	46.30
10	2 176		7.46	873	8.91	45.60	96.97
20	1 984	1 973	7.65	1 265	38.20	104.20	134.13
30	1 817		8.28	1 666	62.17	156.90	—
50	2 017		8.57	1 970	70.00	162.70	—

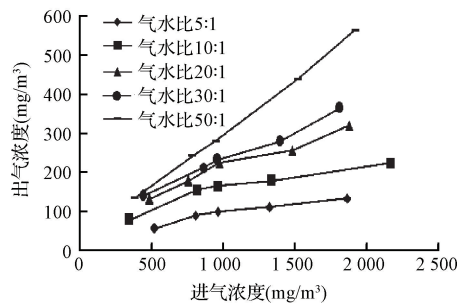
由图2、图3和表4可知,在进气浓度相同时,气水比的改变会导致去除率发生改变。相同进气浓度下,气水比增大,出气浓度升高,去除率降低,吸收液各水质指标明显上升。当气水比为5或10时,随进气浓度升高,出气浓度变化缓慢,出水水质尚好,这是由于此时吸收液未达饱和,去除率在85%以上,特别是气水比为5时,去除率可达92.8%,这时,吸收液的饱和程度为控制因素。当气水比为20、30和50时,随着进气浓度升高,出气浓度明显升高,出水水质变差,这是由于此时吸收液趋于饱和,气水比逐渐成为吸收程度的控制因素。

### 3.2.2 进气二氧化硫浓度对其去除率的影响

实验条件:进水为污水处理厂生化处理出水,进气为污泥焚烧烟气,进水 pH = 7,进气温度为 30 ~ 35 $^{\circ}\text{C}$ ,改变进气二氧化硫浓度。实验结果如图4和图5所示。

图4 进气  $\text{SO}_2$  浓度对其去除率的影响Fig. 4 Effect of  $\text{SO}_2$  concentration at entrance on  $\text{SO}_2$  removal efficiency

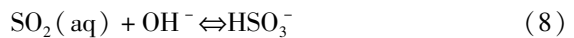
由图4和图5可知,在其他条件相同时,随着进气浓度改变,二氧化硫去除率也发生改变。气水比为5和10时,随着进气浓度升高,去除率基本呈上升趋势,出气浓度变化缓慢。当气水比大于20,进

图5 进气  $\text{SO}_2$  浓度与出气  $\text{SO}_2$  浓度的关系Fig. 5 Relation between  $\text{SO}_2$  concentration at entrance and  $\text{SO}_2$  concentration of effluent gas

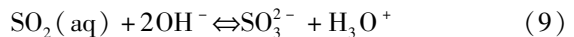
气浓度 1 000  $\text{mg}/\text{m}^3$  以上时,去除率上升缓慢或略有下降,出气浓度明显上升,这是由于吸收能力逐渐饱和,随着进气浓度升高,溶液中二氧化硫吸收效率下降,出气二氧化硫浓度不断升高,去除率逐渐趋于平缓或降低。

### 3.2.3 进水 pH 对二氧化硫去除率的影响

水中  $\text{OH}^-$  与  $\text{SO}_2$  的反应为:



当 pH 较高时,过量的  $\text{OH}^-$  与  $\text{SO}_2$  的反应为:



由于  $\text{HSO}_3^-$  的存在不利于  $\text{SO}_2$  的吸收,因此  $\text{OH}^-$  浓度需达到一定要求才能达到较好的吸收效果。当水中  $\text{OH}^-$  过量时,过量的  $\text{OH}^-$  与  $\text{HSO}_3^-$  反应,这样就可以消除  $\text{HSO}_3^-$  的影响,因此 pH 不同时,  $\text{SO}_2$  的吸收效率也不同<sup>[19]</sup>。

实验条件:进水为污水处理厂生化处理出水,进气为污泥焚烧烟气,进气温度为 30 ~ 35 $^{\circ}\text{C}$ ,气水比为 10:1,进水 pH 分别为 4、7、9 和 11。实验结果如图6和表5所示。

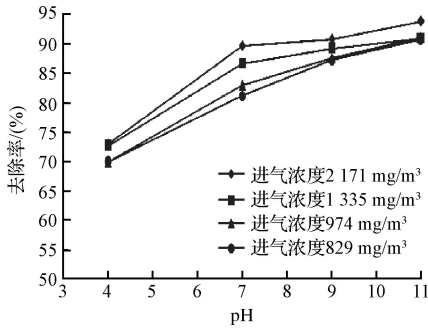


图 6 进水 pH 对 SO<sub>2</sub> 去除率的影响

Fig. 6 Effect of pH on SO<sub>2</sub> removal efficiency

表 5 各工况条件下进、出水 pH 变化

Table 5 pH change of influent and effluent

气水比	进气浓度 (mg/m <sup>3</sup> )		pH	
	浓度	均值	进水	出水
10	2 189	2 171	3.95	6.21
10	2 176		7.05	7.46
10	2 088		9.00	7.06
10	2 230		10.98	8.52

由图 6 和表 5 可知,当气水比、进气浓度一定时,改变进水 pH,吸收效果亦改变。随着进水 pH 值的升高,去除率明显呈上升趋势。pH = 11 时,去除率最高可达 93.8%。

### 3.2.4 投加氢氧化钙百分比对二氧化硫去除率的影响

实验条件:进气为污泥焚烧烟气,进气温度的 30~35℃,气水比为 10:1,进水为污水处理厂生化处理出水中分别投加百分比为 0.00%、0.01% 和 0.03% 的氢氧化钙所得,实验结果如图 7 所示。

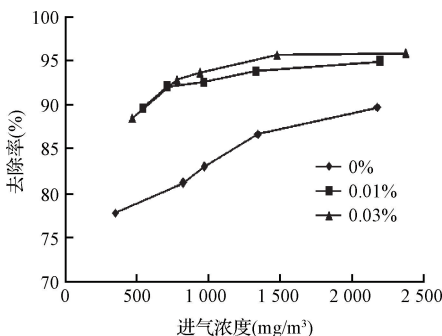


图 7 投加氢氧化钙百分比对 SO<sub>2</sub> 去除率的影响

Fig. 7 Effect of Ca(OH)<sub>2</sub> percent on SO<sub>2</sub> removal efficiency

由图 7 可知,随着向吸收液中投加的氢氧化钙质量分数的变化,去除率也发生变化。投加百分比越大,去除率越高。在最高进气浓度下,投加百分比为 0.01% 时,二氧化硫去除率为 94.9%;投加百分比为 0.03% 时,二氧化硫去除率为 95.8%。从成本方面考虑,投加百分比 0.01% 的氢氧化钙比较合适。

## 4 结 论

(1) 污泥焚烧可以大大减少污泥的重量和体积,充分处理不适于资源利用的城市污泥,是一种相对安全的污泥处理方式。

(2) 污水处理厂生化出水能够有效吸收污泥焚烧烟气中的二氧化硫、重金属等污染物质,使出气能够达标排放。

(3) 本工艺采用污水处理厂生化出水净化吸收污泥焚烧烟气,不会发生管路堵塞问题,具有吸收效率高、系统简单可靠的优点,是一种以废治废,不产生二次污染的新方法,是大规模污水回用的新思路。

## 参 考 文 献

- [1] 池勇志,迟季平,马颜,等. 城镇污水污泥性质与处理处置概况. 环境科学与技术, 2011, 33 (12F): 169-172  
Chi Yongzhi, Chi Jiping, Ma Yan, et al. Survey on sewage sludge characteristics and treatment and disposal. Environmental Science & Technology, 2011, 33(12F):169-172 (in Chinese)
- [2] 张辰. 污泥处理处置技术研究进展. 北京:化学工业出版社, 2005
- [3] 王雅婷. 城市污水厂污泥的处理处置与综合利用. 环境科学与管理, 2011, 36(1): 90-94  
Wang Yating. Municipal sewage sludge treatment and disposal and comprehensive utilization. Environmental Science and Management, 2011, 36(1):90-94 (in Chinese)
- [4] 李金红,何群彪. 欧洲污泥处理处置概况. 中国给水排水, 2005, 21(1):101-103  
Li Jinhong, He Qunbiao. Survey on sludge disposal and treatment in Europe. China Water & Wastewater, 2005, 21(1):101-103 (in Chinese)
- [5] 郝晓地,张璐平,兰荔,等. 剩余污泥处理/处置方法的全球概览. 中国给水排水, 2007, 23(20):1-5  
Hao Xiaodi, Zhang Luping, Lan Li, et al. Global overview of excess sludge treatment and disposal methods. China Water & Wastewater, 2007, 23(20):1-5 (in Chinese)
- [6] 余杰,田宁宁,王凯军,等. 中国城市污水处理厂污泥处

- 理、处置问题探讨分析. 环境工程学报, **2007**, 1(1): 82-86
- Yu Jie, Tian Ningning, Wang Kaijun, et al. Analysis and discussion of sludge disposal and treatment of sewage treatment plants in China. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2007**, 1(1):82-86(in Chinese)
- [7] 王飞, 朱小玲, 李博, 等. 污泥干化焚烧过程中污染物排放的研究. 给水排水, **2011**, 37(5):22-26
- Wang Fei, Zhu Xiaoling, Li Bo, et al. Study on the pollutants emission in sludge drying and incineration. Water & Wastewater Engineering, **2011**, 37(5):22-26 (in Chinese)
- [8] 万伟泳. 城市污水处理厂脱水污泥的焚烧处置. 中国给水排水, **2006**, 22(18):68-71
- Wan Weiyong. Incineration disposal of dehydrated sludge from urban wastewater treatment plant. China Water & Wastewater, **2006**, 22(18):68-71 (in Chinese)
- [9] 王凯军, 俞金海, 俞其林. 新型污泥干化/焚烧技术的试验研究. 中国给水排水, **2008**, 24(11):43-46
- Wang Kaijun, Yu Jinhai, Yu Qilin. Experimental study on new drying/incineration process for sludge treatment. China Water & Wastewater, **2008**, 24(11):43-46(in Chinese)
- [10] 张秀云, 郑继成. 国内外烟气脱硫技术综述. 电站系统工程, **2010**, 26(4):1-2
- Zhang Xiuyun, Zheng Jicheng. Summary of flue gas desulfurization technology at home and abroad. Power System Engineering, **2010**, 26(4):1-2 (in Chinese)
- [11] An Enke, Wei Dunsong. Discussion of wet process of FGD. Environmental Engineering, **2001**, 19(2):25-26
- [12] 王华, 祝社民, 李伟峰, 等. 烟气脱硫技术研究新进展. 电站系统工程, **2006**, 22(6):5-7
- Wang Hua, Zhu Shemin, Li Weifeng, et al. New development of controlling SO<sub>2</sub> pollution from flue gas. Power System Engineering, **2006**, 22(6):5-7 (in Chinese)
- [13] Jim Dickerman P. E., Melissa Sewell. It is time to rethink SO<sub>2</sub> control technology selection. Power Engineering, **2007**, 111(11):132-135
- [14] 陈涛, 孙水裕, 刘敬勇, 等. 不同焚烧温度下开发区污泥焚烧渣分析. 环境工程学报, **2010**, 4(7):1629-1635
- Chen Tao, Sun Shuiyu, Liu Jingyong, et al. Investigation on the slag formed during sludge incineration at different temperatures. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2010**, 4(7):1629-1635 (in Chinese)
- [15] 沈伯雄, 郭彩霞, 吴顺伟. 焚烧污泥重金属迁移的研究进展. 电站系统工程, **2008**, 24(1):15-40
- Shen Boxiong, Guo Caixia, Wu Shunwei. Research progress of heavy trace metal migration during the incineration of sludge. Power System Engineering, **2008**, 24(1):15-40(in Chinese)
- [16] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GB 4284-1984 农用污泥中污染物控制标准. 北京: 中国标准出版社, **1984**
- [17] 国家环境保护总局. GB18485-2001 生活垃圾焚烧污染控制标准. 北京: 中国标准出版社, **2001**
- [18] 国家环境保护局. GB8978-1996 污水综合排放标准. 北京: 中国标准出版社, **1996**
- [19] 杜谦, 马春元, 董勇, 等. 循环浆液 pH 值对湿法烟气脱硫过程的影响. 热能动力工程, **2006**, 21(5):491-495
- Du Qian, Ma Chunyuan, Dong Yong, et al. The impact of the pH value of circulating slurry on a wet flue gas desulfuration process. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, **2006**, 21(5):491-495 (in Chinese)