

方平, 唐子君, 唐志雄, 等. 尿素-SNCR 法脱除污泥与煤混烧烟气中 NO_x 试验研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(3): 104-107. Fang Ping, Tang Zijun, Tang Zhixiong, et al. Experimental study on denitrification from sewage sludge and coal Co-firing flue gas using urea-SNCR technology[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(3): 104-107.

尿素-SNCR法脱除污泥与煤混烧烟气中 NO_x 试验研究

方平^{1,2}, 唐子君², 唐志雄², 岑超平^{2*}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 广州华科环保工程有限公司, 广东 广州 510655)

摘要 文章在 200 m³/h 烟气中试验平台上开展污泥与煤混烧烟气 SNCR 脱硝试验研究。在研究污泥与煤混烧 NO_x 排放特性基础上, 关注 NO_x 的去除效率, 研究还原剂种类、燃烧温度、氨氮比、添加剂等因素对尿素-SNCR 法脱硝的影响。实验结果表明污泥的添加会导致烟气中 NO_x 和 SO_2 排放浓度显著增加, 还原剂种类、燃烧温度、氨氮比对尿素-SNCR 法脱硝具有重要影响, 脱硝效率随着尿素浓度、氨氮比的增大而增加, 随着燃烧温度的升高先增加后减小。当尿素使用浓度为 12%, 氨氮比为 1.5:1, 温度区间为 850~900 °C 时, 尿素-SNCR 法脱硝效率可达到 50%, 同时 H_2O_2 添加剂对 SNCR 脱硝具有明显的促进作用。该技术非常适合工业锅炉协同处置城市污泥烟气脱硝应用。

关键词 污泥; 混烧; 尿素; SNCR; 脱硝

中图分类号: X511 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2014.03.020 文章编号: 1003-6504(2014)03-0104-04

Experimental Study on Denitrification from Sewage Sludge and Coal Co-firing Flue Gas Using Urea-SNCR Technology

FANG Ping^{1,2}, TANG Zijun², TANG Zhixiong², CEN Chaoping^{2*}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Huake Environmental Protection Engineering Co Ltd, Guangzhou 510655, China)

Abstract: The experiments were performed in a 200 m³/h pilot platform to study NO_x removal using urea-SNCR technology. On the basis of the study of sewage sludge and coal burning NO_x emission characteristics with focus on NO_x removal efficiencies, the influences of reducing agent, combustion temperature, ammonia ratio and additives were systematically investigated. Results indicated that NO_x and SO_2 emission concentrations in the flue gas were significantly increased when adding sludge to the coal. Denitrification efficiency of the urea-SNCR technology was significant influenced by reducing agent, combustion temperature and ammonia ratio, with denitrification efficiency increase with the increment of urea concentration and ammonia ratio. Denitrification efficiency increased as the combustion temperature was increased at first and then decreased with the increment of combustion temperature. With urea as the reducing agent, when urea concentration was 12 wt%, ammonia ratio was 1.5:1, temperature range of reaction was 850~900 °C, NO_x removal efficiency was 50%, and hydrogen peroxide additive could promote NO_x removal. The urea-SNCR technology is very suitable for the application of flue gas denitrification in industrial boilers collaborative disposal of sewage sludge.

Key words: sewage sludge; co-firing; urea; SNCR; denitrification

近年来, 随着我国城镇污水处理厂数量和污水处理能力的不断增加, 我国城市污泥产生量也日益增大。据估算到 2015 年全国污水处理能力将达到 2.08×10^8 m³/d, 如污泥产率按 6.41 t 湿污泥(含水率 80%)/

万 t-污水计^[1], 则到 2015 年我国湿污泥产量将超过 4 800 万 t, 如此大量城市污泥的产生及其处理处置已成为迫切需要解决的主要环境问题之一。对于城市污泥的处置目前国内外常用的方法主要有填埋、堆肥、

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://jks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkyjs@126.com

收稿日期: 2013-07-25; 修回日期: 2013-09-17

基金项目: 环保公益性行业科研专项重大项目(201109001), 广东省水与大气污染防治重点实验室(2011A060901002), 广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2011A032303002)

作者简介: 方平(1982-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制和固废处置 (电话) 020-85543423 (电子信箱) fangping@scies.org; * 通讯作者 (电话) 020-85557692 (电子信箱) cenchaoping@scies.org。

土地利用、焚烧和热解^[2-3]等,其中污泥焚烧技术由于具有减量化程度高、处理速度快、占地面积小、可回收能量用于供热或发电等优点^[4],受到国内外的广泛关注。但是单独建造污泥焚烧厂存在投资成本高、选址困难,且老百姓心里难于接受易引起社会矛盾等问题^[5],实际推广应用受到限制。如果将污泥作为辅助燃料与煤等燃料混合用于电厂锅炉、工业锅炉燃烧,则将在很大程度上减轻或避免上述问题的发生。一般而言电厂锅炉都建有较为完善的除尘、脱硫、脱硝(主要是 SCR 脱硝技术)等^[5-6]烟气治理设施,协同处置污泥所带来的环境影响不大,但是目前国内的工业锅炉烟气治理大都仅建设了除尘和脱硫设施,脱硝设施较少安装和应用,且安装的脱硝设施以 NH₃-SNCR 脱硝技术为主。SNCR 脱硝技术与 SCR 脱硝技术相比脱硝效率较低(40%左右)^[7-8],但该技术不需要催化剂、投资和运行成本较低、设备占地面积较小、应用范围较广且易与其他脱硝技术组合,因此较适合在工业锅炉上应用。目前国内外已有较多研究者开展了燃煤锅炉 SNCR 脱硝技术应用研究^[9-11],但在污泥与煤混烧条件下的尿素-SNCR 脱硝技术应用研究较少,因此开展工业锅炉协同处置城市污泥情况下尿素-SNCR 脱硝技术适应性研究非常必要。

为此,本文开展污泥与煤混烧条件下的 SNCR 脱硝技术应用研究,在分析研究污泥与煤混烧 NO_x 排放特性基础上,重点研究还原剂种类、氨氮比、燃烧温度等条件对 NO_x 去除规律的影响,以期对 SNCR 技术在工业锅炉协同处置城市污泥烟气脱硝中的应用研究提供一定的实验数据。

1 试验

表 1 污泥与煤元素分析、工业分析与低位热值

Table 1 Proximate,ultimate analysis and low heat value of coal and sludge

试样	元素分析/%					工业分析/%				空气干燥基低位热值 Q _{net,ad} /kJ·kg ⁻¹
	ω(C)	ω(H)	ω(N)	ω(S)	ω(O)	ω(M _{ad})	ω(A _{ad})	ω(V _{ad})	ω(FC _{ad})	
污泥	17.728	1.925	2.857	8.632	15.783	3.267	57.113	39.422	0.198	10 172.1
煤	78.782	2.748	1.472	0.75	12.268	6.478	20.089	18.181	55.252	23 039.50

注:空气干燥基低位热值为计算值,公式为 Q_{net,ad}=34 813.7-24.7V_{ad}-382.2A_{ad}-563.0M_{ad}(kJ/kg),V_{ad}、A_{ad}、M_{ad}单位为(%)。

2.2 污泥与煤混烧 SO₂、NO_x 排放

在开展 SNCR 脱硝试验之前,对在不同燃烧温度下以煤为燃料和以“污泥+煤”为燃料的烟气中 NO_x 和 SO₂ 排放情况进行对比研究,实验结果见图 1、图 2。可见,随着燃烧温度的增加,烟气中 NO_x 和 SO₂ 的排放浓度增加,在相同燃烧温度下污泥的添加使得烟气中的 NO_x 和 SO₂ 排放浓度明显增加。以燃烧温度 900 °C 为例,在不添加污泥的燃烧情况下,烟气中 NO_x 和 SO₂ 排放浓度分别为 329.59 mg/m³ 和 599.03 mg/m³,

1.1 试剂和仪器

试验所用煤为无烟煤,污泥选用佛山市某一工业园区污水厂脱水污泥,初始含水率为 60%,经自然风干 2 d,测定含水率约为 40%;主要实验试剂:尿素(≥ 99 wt.%,广州化学试剂厂);氨水(25 wt.%,广州化学试剂厂)。

主要试验仪器 EA3000 型元素分析仪(意大利 EuroVector),J2KN 多功能烟气分析仪(德国 ECOM)。

1.2 试验装置与试验方法

在自行设计和搭建的 200 m³/h 实际烟气试验平台上开展污泥与煤混烧烟气 SNCR 脱硝试验研究。试验过程中固定污泥与煤混烧质量比为 1:3,即污泥混烧比为 25 wt.%.试验开始前,先用无烟煤为燃料将锅炉炉膛升温至 600 °C 以上,随后投加污泥与煤混合燃料,达到设定温度,稳定 30 min,随后根据设计的试验方案开展相应的试验研究。

2 试验结果与讨论

2.1 污泥与煤的元素、工业分析

污泥与无烟煤的元素分析、工业分析及热值分析见表 1。可见与煤相比,污泥的碳元素含量低,而 N、S 元素含量高,因此污泥与煤混烧必然会增加 NO_x 和 SO₂ 的排放浓度。同时污泥的灰分含量高,固定碳和挥发分含量低,与煤相比单位热值低,污泥与煤混烧会降低燃料热值同时增加烟气中颗粒物的排放量。因此污泥与煤混烧存在最佳混合比范围的问题,保证即不影响锅炉正常工作,又不至于 NO_x、SO₂ 和颗粒物等大气污染物排放增加过多。根据项目组前期研究和国内外研究进展,结合实验研究目的,本实验选定的污泥与煤混烧比例为 25 wt.%。

当添加质量比为 25 wt.%的半干污泥时,NO_x 和 SO₂ 排放浓度分别为 357.33 mg/m³ 和 1 137.27 mg/m³。可见当利用现有工业锅炉开展污泥掺烧利用时,必须加强烟气污染控制。

2.3 SNCR 脱硝实验

上述对比试验表明,掺烧污泥将会导致烟气中 NO_x 和 SO₂ 排放浓度明显增加。对于 SO₂ 的控制目前国内已有成熟的脱硫技术和设备,而对工业锅炉烟气中 NO_x 的控制目前正在推广和应用的技术主要是

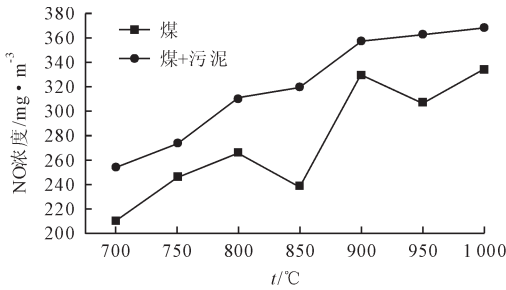


图1 不同温度下NO排放情况
Fig.1 NO emissions under different temperatures

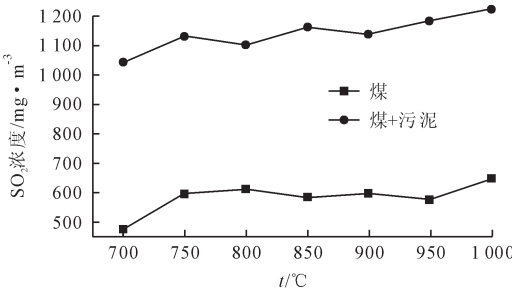


图2 不同温度下SO₂排放情况
Fig.2 SO₂ emissions under different temperatures

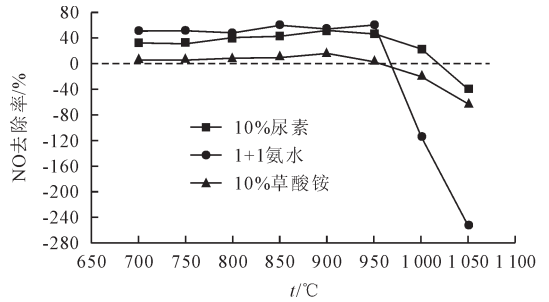
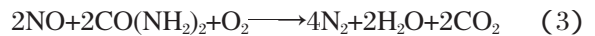
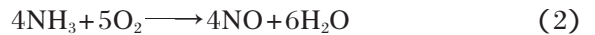


图3 还原剂对NO去除影响
Fig.3 The effect of reducing agent on NO removal efficiency



在上述试验基础上,考虑到氨水属于危险化学品,其生产、运输、使用过程都有严格要求,同时对于广东省而言氨水的来源非常有限,大规模工业应用易受到氨水供应限制,因此结合实际情况,本试验SNCR脱硝还原剂选择尿素。

2.3.2 尿素浓度的影响

在850~900 °C温度区间,相同喷氨速率条件下,尿素浓度对NO去除效率的影响见图4。可见随着尿素浓度的增加NO去除率增大,当尿素浓度为10%时,即氨氮比为1.2:1时,NO去除率达到46%,而当尿素浓度增加到12%时,此时氨氮比接近为1.5:1时,NO去除率达到50%。可见在相同喷氨速率条件下,尿素浓度对NO去除率的影响实质上就是氨氮比对NO去除率的影响,尿素浓度高,氨氮比就大,对NO的去除率就高,但过高的氨氮比会导致出口NH₃逃逸量增加,因此较佳的尿素浓度为12%。

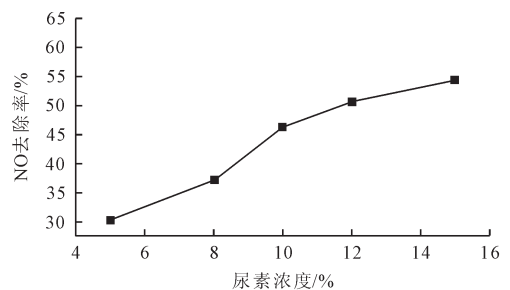


图4 尿素浓度对NO去除影响
Fig.4 The effect of urea concentration on NO removal efficiency

2.3.3 氨氮比的影响

固定尿素浓度为12%,温度区间为850~900 °C,改变尿素溶液喷射速率,即改变还原剂喷射量,或是改变氨氮比,脱硝试验结果见图5。可见随着氨氮比的增加,脱硝效率逐渐增大,但过高的氨氮比会导致NH₃逃逸量增加,较佳的氨氮比为1.4~1.5:1,此时脱硝效率可达50%以上,氨逃逸率在10×10⁻⁶以下。

SNCR脱硝技术。本试验主要开展污泥与煤混烧烟气中的SNCR脱硝技术工艺条件研究。

2.3.1 还原剂的选择

目前常用的SNCR脱硝还原剂主要有氨水和尿素2种,其中氨水应用较多。使用过程中上述2种还原剂均是被喷入炉膛合适的温度区间,以便与烟气中NO发生氧化还原反应,去除NO。但是氨水和尿素在使用条件、去除效率、原料来源存储等方面也存在差异,图3为(1+1)氨水、10%尿素、10%草酸铵3种脱硝还原剂在相同氨氮比(1.2:1,以氨计)、不同温度区间的脱硝效率。可见3种还原剂中,氨水的脱硝效果最好,最佳的温度区间是800~950 °C,对NO的平均去除率能达到55%以上,但当温度超过950 °C之后,去除效率明显下降,甚至出现负去除率,原因可归结为本试验条件下氨水喷入的温度区间过高,使得喷入的氨水发生以氧化为主的化学反应,大量的NH₃被氧化为NO,见式(1)、(2)。尿素对NO的去除率相对较差,其对NO的去除随着温度的升高而增加,但当温度超过950 °C时,随温度升高去除率下降,但下降幅度比氨水还原剂小,最佳脱硝温度区间为800~950 °C,此区间NO平均去除率为45%左右,其脱硝反应方程见式(3)。与氨水、尿素相比,草酸铵对NO的去除效果最差,脱硝温度区间最窄,在850~900 °C范围内,NO平均去除率仅为13%,因此不适合实际应用。



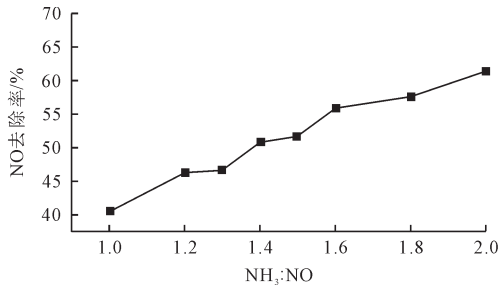


图5 氨氮比对NO去除影响

Fig.5 The effect of ammonia ratio on NO removal efficiency

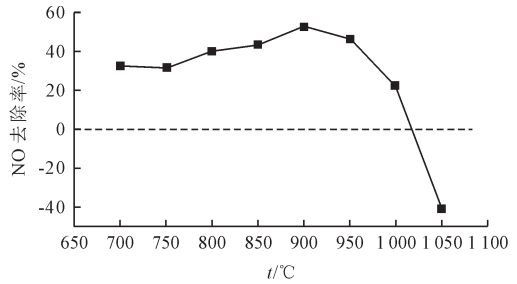


图6 反应温度对NO去除影响

Fig.6 The effect of reaction temperature on NO removal efficiency

2.3.4 燃烧温度的影响

固定尿素浓度为 12% ,氨氮比为 1.5:1 ,考察燃烧温度对脱硝效率的影响 ,试验结果见图 6。由图 6 可见 ,随着燃烧温度的升高化学反应速率增大 ,脱硝效率增加 ,但当温度超过 950 °C 之后 ,随着燃烧温度的升高脱硝效率急剧下降 ,甚至当温度超过 1 000 °C ,脱硝效率为负值。因此采用尿素溶液脱硝存在最佳温度范围 ,本试验的最佳温度区间为 800~950 °C。

2.3.5 添加剂的影响

固定尿素浓度为 12% ,氨氮比为 1.5:1 ,温度区间为 850~900 °C ,研究(NH₄)₂CO₃、Na₂CO₃、H₂O₂ 等添加剂对尿素-SNCR 脱硝的促进作用 ,试验结果见表 2。可见(NH₄)₂CO₃ 和 Na₂CO₃ 添加剂的加入对脱硝几乎没有影响 ,但 H₂O₂ 的添加对脱硝具有明显的促进作用 ,实际应用中可适当添加。

3 结论

表 2 添加剂对 NO 去除影响
Table 2 The effect of additive on NO removal efficiency

	12%尿素	12%尿素+0.01%(NH ₄) ₂ CO ₃	12%尿素+0.01%Na ₂ CO ₃	12%尿素+0.05%H ₂ O ₂
NO 去除率%	51.05	51.56	48.53	56.14

对尿素-SNCR 法脱除污泥与煤混烧烟气中 NO_x 开展了试验研究 ,结果表明污泥的添加会导致烟气中 NO_x 和 SO₂ 排放浓度增加 ,还原剂、燃烧温度、氨氮比等因素对尿素-SNCR 法脱硝具有重要影响 ,当尿素浓度为 12% ,氨氮比为 1.5:1 ,温度区间为 850~900 °C 时 ,尿素-SNCR 法脱硝效率可达到 50% ,同时 H₂O₂ 添加剂的加入对脱硝具有明显的促进作用。尿素-SNCR 脱硝技术具有占地面积小、改造安装简单、运行使用成本较低等优点 ,在工业锅炉烟气治理领域具有很好的应用前景。

[参考文献]

[1] 唐子君,岑超平,方平. 城市污水污泥与煤混烧的热重试验研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(11): 878-884.
Tang Zijun, Cen Chaoping, Fang Ping. Thermogravimetric experiment on co-firing characteristics of coal with municipal sewage sludge[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(11): 878-884. (in Chinese)

[2] 万立国,田禹,张丽君,等. 污水污泥高温热解技术研究现状与进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6): 109-113.
Wan Liguoguo, Tian Yu, Zhang Lijun, et al. Status and progress on high temperature pyrolysis of sewage sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(6):109-114. (in Chinese)

[3] 方平,岑超平,唐子君,等. 污泥焚烧大气污染物排放及其控制研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 70-80.

Fang Ping, Cen Chaoping, Tang Zijun, et al. Air pollutants emission and their control from sludge incineration: a review [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10): 70-80. (in Chinese)

[4] 武宏香,赵增立,李海滨,等. 污泥与煤、木屑的混合燃烧特性及动力学研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7): 73-77, 79.
Wu Hongxiang, Zhao Zengli, Li Haibin, et al. Co-combustion of sewage sludge, coal and sawdust[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(7): 73-77, 97. (in Chinese)

[5] J D Wang, C Q Wu, J M Chen, et al. Denitrification removal of nitric oxide in a rotating drum biofilter[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 121(1): 45-49.

[6] Fang Ping, Cen Chaoping, Tang Zhixiong, et al. Simultaneous removal of SO₂ and NO_x by wet scrubbing using urea solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168(1): 52-59.

[7] Z H Wang, J H Zhou, Y Q Zhu, et al. Simultaneous removal of NO_x, SO₂ and Hg in nitrogen flow in a narrow reactor by ozone injection:experimental results[J].Fuel Processing Technology, 2007, 88(8): 817-823.

[8] Fang Ping, Cen Chaoping, Wang Xinming, et al. Simultaneous removal of SO₂, NO and Hg⁰ by wet scrubbing using urea+KMnO₄ solution[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106(2): 645-653.

[9] Shiva Mahmoudi, Jan Baeyens, Jonathan P K Seville. Nox formation and selective non-catalytic reduction (SNCR) in a fluidized bed combustor of biomass[J].Biomass and Bioener-

(下转第 131 页)

- Wang Xuke, Zhu Ying, Zou Yina. Discussion on factors affecting advanced mechanical sludge dewatering [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(10): 23–25. (in Chinese)
- [8] 许景文. 污泥深度脱水技术[J]. 上海环境科学, 1985, 15(1): 40–41.
Xu Jingwen. Advanced mechanical sludge dewatering [J]. Shanghai Environmental Science, 1985, 15 (1): 40–41. (in Chinese)
- [9] 陈银广, 杨海真, 吴桂标, 等. 表面活性剂改进活性污泥的脱水性能及其作用机理[J]. 环境科学, 2000, 21(5): 97–100.
Chen Yinguang, Yang Haizhen, Wu Guibiao. Surfactant improving activated sludge dewaterability and its mechanism[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2000, 21(5): 97–100. (in Chinese)
- [10] 任延杰. 新型板框污泥脱水技术的应用[J]. 环境与可持续发展, 2010(5): 49–52.
Ren Yanjie. Application of new frame sludge dewatering technology[J]. Environment and Sustainable Development, 2010(5): 49–52. (in Chinese)
- [11] 杨辉, 刘晓林, 夏江, 等. 板框式压滤机在文明污水站的应用与改造[J]. 石油机械, 2005, 33(9): 88–90.
Yang Hui, Liu Xiaolin, Xia Jiang. Application and improvement of filter press in sewage station[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(9): 88–90. (in Chinese)
- [12] 郭丁香, 吴振强. 核苷酸厂废水生物污泥成分分析及资源化利用初探[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(35): 21982–21985.
Guo Dingxiang, Wu Zhenqiang. Primary investigation on ingredient analysis and resource utilization of bio-sludge from sewage treatment in nucleotide factory[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39 (35): 21982–21985. (in Chinese)
- [13] 蒋建国, 杜雪娟, 杨世辉, 等. 城市污水厂污泥衍生燃料成型的研究[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 904–909.
Jiang Jianguo, Du Xuejuan, Yang Shihui. Study on the granulating characteristics of sewage sludge derived fuel[J]. China Environmental Science, 2008, 28(10): 904–909. (in Chinese)
- [14] 万志键, 骆冠琦. 用红外水分快速测定仪测定污泥含水率[J]. 理化检验—化学分册, 2004, 40(12): 733.
Wan Zhijian, Luo Guanqi. Determination of moisture content in sludge using the rapid IR–moisture determinator[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2004, 40(12): 733. (in Chinese)
- [15] 孟范平, 赵顺顺, 张聪, 等. 青岛市城市污水处理厂污泥成分分析及利用方式初步研究[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(6): 1007–1012.
Meng Fanping, Zhao Shunshun, Zhang Cong. Preliminary study on the composition and utilization of urban sewage sludge in Qingdao City [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(6): 1007–1012. (in Chinese)
- [16] Lin Y F, Jing S R, lee D Y. Recycling of wood chips and wheat dregs for sludge processing[J]. Bioresource Technology, 2001, 76(2): 161–163.
- [17] 程俊, 胡小虎, 姚宝军. 污泥机械深度脱水方法对比研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2010(5): 47–50.
Chen Jun, Hu Xiaohu, Yao Baojun. The contrastive study of sludge mechanical deep dehydration methods[J]. Journal of the Environmental Management College of China –EMCC, 2010(5): 47–50. (in Chinese)
- [18] 葛成雷, 吴朝军. 造纸污泥深度脱水技术研究进展[J]. 中华纸业, 2012, 33(4): 6–10.
Ge Chenglei, Wu Chaojun. Progress on research of paper mill sludge advanced dehydration[J]. China Pulp & Paper Industry, 2012, 33(4): 6–10. (in Chinese)
- [19] 金建华, 苗兆静. 污泥脱水中 PAC 与 PAM 联合使用的试验研究[J]. 江苏环境科学, 2006, 19(2): 4–6.
Jin Jianhua, Miao Zhaojing. Experiment on sludge dewatering by using PAC and PAM[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2006, 19(2): 4–6. (in Chinese)
- [20] 王绪科, 朱英, 邹艺娜, 等. 影响污泥深度机械压力脱水因素的探讨[J]. 中国给水排水, 2012, 28(10): 23–25.
Wang Xuke, Zhu Ying, Zou Yina. Discussion on factors affecting advanced mechanical sludge dewatering[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(10): 23–25. (in Chinese)

(上接第 107 页)

- gy, 2010, 34(9): 1393–1409.
- [10] Jacob Maller, Bjarne Munk, Crillesen K. Life cycle assessment of selective non-catalytic reduction (SNCR) of nitrous oxides in a full-scale municipal solid waste incinerator [J]. Waste Management, 2011, 31(6): 1184–1193.
- [11] 赵炬明, 杨运超, 石岩, 等. 复合气体添加剂影响 SNCR 简化反应机理模型[J]. 节能技术, 2010, 28(6): 497–499.
Zhao Juming, Yang Yunchao, Shi Yan, et al. Reduced model for mechanism on selective non-catalytic reduction process considering the influence of multicomponent gas additives[J]. Energy Conservation Technology, 2010, 28 (6): 497–499. (in Chinese)