

孙韶玲, 盛彦清, 孙启耀, 等. 活性炭吸附法处理污泥热干化蒸汽的研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(1): 118-122. Sun Shaoling, Sheng Yanqing, Sun Qiyao, et al. Study on purification of steam from sludge thermal drying by adsorption of activated carbon[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(1): 118-122.

# 活性炭吸附法处理污泥热干化蒸汽的研究

孙韶玲<sup>1,2</sup>, 盛彦清<sup>1\*</sup>, 孙启耀<sup>1</sup>, 郑猛<sup>1</sup>, 李兆冉<sup>1</sup>, 孙详彧<sup>1</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所山东省海岸带环境工程技术研究中心 山东 烟台 264003;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 污泥热干化废水的有效处理一直是水处理行业的技术难题之一。通过采用活性炭吸附法处理污泥热干化过程中产生的蒸汽, 研究其对冷凝水中 COD、氨氮的去除效果, 同时探索了污泥脱水过程中聚丙烯酰胺的添加对污泥干化冷凝废水中氨氮含量的影响。结果表明, 聚丙烯酰胺对污泥干化冷凝废水中高浓度氨氮的影响不足 3%, 可以忽略不计。经处理后得到的冷凝水中的 COD 去除效果明显, 活性炭添加量为 30 g/L 时, 处理后得到的冷凝水中的 COD 小于 50 mg/L (去除率高达 98%), 达到《污水排放综合标准》(GB 8978-1996) 中的一级 A 排放标准, 同时对氨氮也有一定的去除效果, 活性炭添加量为 45 g/L 时, 冷凝水中氨氮的去除率也能达到 70% 以上。该方法处理效果显著且经济可行, 为污泥热干化废水的处理提供了新的技术参考。

**关键词:** 活性炭吸附; 污泥热干化; 冷凝水; 蒸汽

中图分类号: X703.1 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2017.01.020 文章编号: 1003-6504(2017)01-0118-05

## Study on Purification of Steam from Sludge Thermal Drying by Adsorption of Activated Carbon

SUN Shaoling<sup>1,2</sup>, SHENG Yanqing<sup>1\*</sup>, SUN Qiyao<sup>1</sup>, ZHENG Meng<sup>1</sup>,

LI Zhaoran<sup>1</sup>, SUN Xiangyu<sup>1</sup>

(1. Research Center for Coastal Environment Engineering Technology of Shandong Province, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Relating to the steam generated from the sludge thermal drying process, which was treated by activated carbon adsorption, thus removing COD and NH<sub>3</sub> in the condensation water, this paper described the experimental study focusing on COD and NH<sub>3</sub>-N removal as well as the influence of polyacrylamide (PAM) that had been added into sludge during the dewatering process on NH<sub>3</sub>-N concentration in condensation water. Results of the experiments showed that addition of PAM made merely 3% contribution to NH<sub>3</sub>-N concentration of condensation water, while the COD removal efficiency in condensation water was notable—as the dosage of activated carbon was 30 g/L, COD concentration was less than 50 mg/L (removal rate: 98%), in compliance with Class 1 of the relevant state *Wastewater Discharge Standard* (GB 8978-1996), while the dosage of activated carbon added to 45 g/L, the removal rate of NH<sub>3</sub>-N in condensed water would be more than 70%.

**Key words:** activated carbon adsorption; sludge thermal drying; condensation water; steam

目前, 城市污水超过 90% 采用活性污泥法进行处理, 产生大量的剩余污泥<sup>[1]</sup>。污泥成分复杂, 通常含有大量有机物, 性质不稳定, 易腐化发臭, 若不妥善处理将对环境和人类以及动物健康造成较大的危害<sup>[2]</sup>。国内外关于污泥处理处置方法主要分 2 类, 一是应用浓缩、脱水、干燥和焚烧等固液分离技术实现污泥的减

量化; 另一类是通过消化、堆肥、建材制造等有机物分解和能源资源回收再利用技术实现污泥的安定化及资源化<sup>[3-5]</sup>。这些处理方法主要包括污泥焚烧、卫生填埋、污泥堆肥、污泥热干化等<sup>[6-8]</sup>。污泥燃烧虽然能最大限度地减少污泥体积, 但有机物焚烧往往会产生有毒物质<sup>[9]</sup>。卫生填埋操作简单, 适应性强, 处理费用较低,

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

收稿日期: 2016-03-26; 修回日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373100); 中国科学院关键技术人才项目

作者简介: 孙韶玲(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事水污染控制与治理研究工作 (电子信箱) [1262900446@qq.com](mailto:1262900446@qq.com); \* 通讯作者 (电子信箱) [yqsheng@yic.ac.cn](mailto:yqsheng@yic.ac.cn)。

但如果防渗技术不够,将会污染土壤和地下水<sup>[10]</sup>。污泥堆肥能使污泥质地疏松,容重减小,杀死其中的病原菌和寄生虫卵,被资源化利用,但由于较高的重金属等毒性物质的含量也限制了该方法的广泛应用<sup>[11]</sup>。由于污泥热干化处理能使污泥体积和质量大幅降低,有效去除细菌和病原体,同时保持了其中的营养成分和热值<sup>[12-13]</sup>,不仅有效降低了污泥含水率,而且干化后的污泥可直接填埋或焚烧,也可进一步处理作为土壤改良剂、肥料或建材等<sup>[14]</sup>。因此,污泥热干化在我国的应用较为普遍。但是由于高温干化过程会使污泥中的微生物裂解,脂肪、蛋白质等大分子物质水解,释放大 量挥发性物质,使得冷凝水中含有大量氨氮和有机物<sup>[15]</sup>,致使干化后的冷凝废水化学需氧量(COD)、氨氮含量较高<sup>[16]</sup>。目前,专门针对污泥干化冷凝水的生物处理技术的研究相对较少<sup>[15]</sup>,且一般的生物处理对高 COD、高氨氮的废水效果不佳<sup>[17]</sup>。而针对污泥热干化蒸汽当作废气进行处理以达到降低冷凝水中 COD、氨氮的研究尚未见报道。

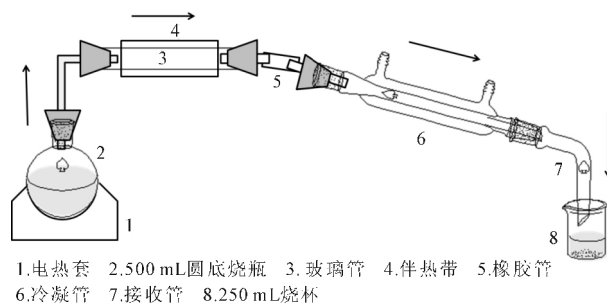
废气的处理方法常用的有吸附法、冷凝法和热破坏法。吸附法由于具有去除效率高、能耗低、处理工艺成熟等优点,使用最为普遍<sup>[18]</sup>。活性炭吸附法是应用活性炭为吸附剂净化有机废气的方法,一方面活性炭具有疏松多孔的结构特征,比表面积大(600~1 600 m<sup>2</sup>/g),具有优异的吸附能力<sup>[19]</sup>;另一方面活性炭的表面有丰富的官能团,这些官能团使活性炭具有独特的化学性能,能与多种物质进行结合<sup>[20]</sup>。污泥热干化蒸汽或废气成分大部分是有机化合物,低分子脂肪酸、胺类、醛类等,还有小部分的无机化合物及氨气等<sup>[12]</sup>,采用活性炭吸附法可能会实现有机物及氨氮的有效去除。

本研究采用污泥热干化后冷凝废水加热蒸馏模拟污泥热干化产生的蒸汽,通过活性炭吸附试验探索冷凝水中 COD、氨氮的去除效果,同时结合实际污泥进行了相关模拟实验,以期对污泥热干化废水的有效处理提供理论基础和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验装置采用自行设计密闭式热干化系统(图 1)。装置主要分为加热、吸附、冷凝 3 部分。实验过程中,将污泥或冷凝废水加入到烧瓶中,用电热套加热,产生的蒸汽进入添加活性炭的玻璃管中,为防止蒸汽在玻璃管中冷凝成液体,在玻璃管外壁上缠绕一圈伴热带,废水蒸汽经活性炭吸附后进入冷凝管冷凝,经接收管流入烧杯中。该装置及流程见图 1。



1.电热套 2.500 mL圆底烧瓶 3.玻璃管 4.伴热带 5.橡胶管  
6.冷凝管 7.接收管 8.250 mL烧杯

图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 未加聚丙烯酰胺的污泥加热干化试验

取得的烟台某公司污泥干化废水,是污泥中已添加聚丙烯酰胺絮凝沉淀富集后,再进行间接热干化冷凝得到的废水,经测定,冷凝水水质情况如表 1。氨氮浓度较高,为识别氨氮来源,实验通过以下方法探索高浓度氨氮与添加聚丙烯酰胺之间的相关性。即利用上述装置(图 1),向烧瓶中加入采集于烟台某污水处理厂活性池曝气单元未添加聚丙烯酰胺的污泥 100 g(污泥体积为 95 mL,多层纱布挤压脱水后称量),在上述装置的玻璃管中不添加活性炭,模拟污泥热干化的过程,观察冷凝水中氨氮的产生量。

表 1 冷凝水水质情况

Table 1 The water quality of condensate condensation water

污染项目	COD/mg·L <sup>-1</sup>	NH <sub>3</sub> -N/mg·L <sup>-1</sup>	pH
污染物浓度	4 000	400	6~9

### 1.2.2 活性炭吸附试验

利用上述装置,对废水蒸汽进行活性炭吸附效果实验。烧瓶中加入污泥干化冷凝废水,每次试验用水样 200 mL,玻璃管中分别添加 1、3、4、5、6、7、8、10、12、16 g 颗粒活性炭。模拟污泥热干化产生废水蒸汽的过程,用电热套加热,温度控制在 180 ℃左右以控制冷凝液流出速度,得到冷凝水,然后分别测定其氨氮和 COD 含量。

### 1.2.3 分析方法

在实验过程中为保证测量的准确性,每个样品的测量值都采用 3 个平行样的平均值。水样的相关指标分析均根据《水和废水监测分析方法(第 4 版)》<sup>[21]</sup>以及相关国家标准测定分析。采用纳氏试剂光度法测定氨氮含量,重铬酸钾法测定 COD 含量,同时利用连续流动分析仪测定冷凝水水样中氮的形态及其含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冷凝废水中氨氮来源与聚丙烯酰胺的相关性

未添加聚丙烯酰胺(PAM)的污泥加热干化得到

的冷凝废水中,氮的形态主要有 3 种:硝态氮、亚硝态氮、铵态氮,其中铵态氮含量最多(表 2),表明冷凝水中氮的形态主要是以铵态氮存在。聚丙烯酰胺的最佳投加量为 60 mg/L<sup>[22]</sup>,即氮含量为 11.82 mg/L(聚丙烯酰胺中氮的含量占 19.7%);未添加聚丙烯酰胺的污泥加热干化得到的冷凝废水中氮含量为 430.04 mg/L,换算得到污泥中可蒸发出来的氮含量(本实验条件下)为 386.63 mg/L(污泥体积为 95 mL,加热干化得到的冷凝水体积为 85.35 mL);推算可得添加聚丙烯酰胺的污泥中聚丙烯酰胺中氮的含量仅占总氮量的 2.97%,量很少,因此,聚丙烯酰胺对污泥干化冷凝废水中高浓度氨氮的影响不足 3%,可以忽略不计。

表 2 未添加聚丙烯酰胺的污泥干化冷凝废水氮含量  
Table 2 The nitrogen content of condensate wastewater by no polyacrylamide sludge drying (mg/L)

项目	硝态氮	亚硝态氮	铵态氮
数值	52	2.6	536.8

## 2.2 活性炭吸附试验

由图 2 可以看出,随着活性炭添加量的增加,冷凝水中的 COD 去除率显著提高,当活性炭添加量 < 20 g/L(每 200 mL 冷凝水用 4 g 活性炭处理)时,随着活性炭添加量的增加,冷凝水中的 COD 去除率迅速提高,添加活性炭量为 20 g/L 时,冷凝水中的 COD 去除率达到 96.11%(冷凝水 COD < 100 mg/L),随后 COD 去除率增加缓慢。当活性炭添加量增加为 30 g/L(每 200 mL 冷凝水用 6 g 活性炭处理)时, COD < 50 mg/L(具体浓度),达到《污水排放综合标准》(GB 8978-1996)中的一级 A 排放标准(具体浓度)。实验过程发现,即使是活性炭添加量为 5 g/L 时, COD 的去除率也能达到 51.33%,而先前一些直接将活性炭添加到废水中降低 COD 的研究中, COD 最高去除效率都低于 52%<sup>[23-26]</sup>。之前单独将活性炭添加到废水中去除 COD 的研究中,控制 pH 6.0,温度 28 °C 的情况下,活性炭投加量为 9.0 g/L 时, COD 去除率仅达到 47.5%<sup>[25]</sup>;用颗粒活性炭吸附焦化废水(冷凝水中)原水的研究中,活性炭投加量为 100 g/L 时, COD 去除率接近 90%<sup>[26]</sup>,而在本研究中,添加活性炭量为 20 g/L 时,冷凝水中的 COD 去除率能达到 96.11%。相比较而言,活性炭吸附处理蒸汽状态下的废水,对 COD 的去除效果更显著,并且在处理效果近似的情况下,活性炭的用量更少。再者,未经处理的供试冷凝水散发着很强烈的恶臭气味,经过添加活性炭的吸附处理后,恶臭气味明显减弱。这可能是由于随着活性炭添加量增多,废水蒸汽中致臭的有机物质、无机物质吸附量增大,恶臭气味去除显著。

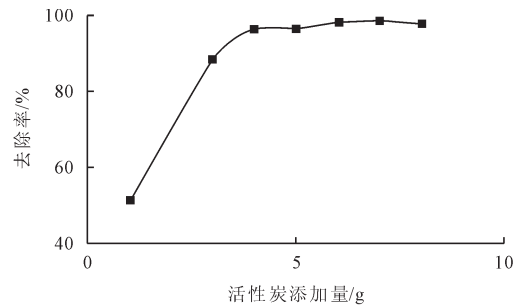


图 2 活性炭添加量对 COD 去除率的影响  
Fig.2 Effect the activated carbon dosage on removal of COD

通过活性炭吸附处理,可以降低冷凝水中的 COD,同时可以去除冷凝水中的部分氨氮。氨氮的去除率随着活性炭添加量的增加呈上升趋势(图 3)。当活性炭添加量 < 15 g/L(每 200 mL 冷凝水用 3 g 活性炭处理)时,随着活性炭添加量的增加,冷凝水中的氨氮去除率显著升高,添加活性炭量为 15 g/L 时,冷凝水中的氨氮去除率达到 54.8%,随后氨氮去除率增加缓慢,添加活性炭量为 45 g/L(每 200 mL 冷凝水用 9 g 活性炭处理)时,冷凝水中氨氮去除率为 70.26%,之后继续增加活性炭量,去除效果已不明显,说明此时,活性炭的添加量是适宜值。本研究中氨氮的去除效果较之前单独用活性炭吸附废水去除氨氮的研究中氨氮的去除效果明显。单独将活性炭投加到废水中处理后,废水中的氨氮去除率仅能达到 45%<sup>[27]</sup>,而在本研究中,随着活性炭添加量的增加,氨氮的去除率最高能达到 70%以上,氨氮含量能降到 50 mg/L 以下。研究结果表明,活性炭吸附处理蒸汽状态下的废水对氨氮的去除具有一定的显著效果。

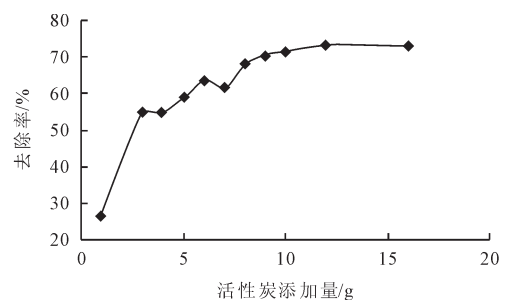


图 3 活性炭添加量对氨氮去除率的影响  
Fig.3 Effect the activated carbon dosage on ammonia nitrogen removal

## 2.3 技术经济分析

随着污泥热干化工艺在我国逐步推广,必然会产生大量污泥干化的冷凝废水,由于该废水组成特殊(如高 COD、高氨氮含量),使得采用常规生化法很难有效处理,因此污泥处理干化冷凝废水的成本较高。在热干化产生蒸汽的过程中添加活性炭,吸附蒸汽中的大量的有机物和无机物,可有效削减冷凝废水中



COD、氨氮。以本研究为例,每处理得到 1 t 的冷凝水需要 30 kg 活性炭,冷凝水中的 COD<50 mg/L,去除率高于 95%,氨氮去除率为 64%。而直接将活性炭投加到废水中的处理,1 t 焦化废水原水,活性炭投加量为 100 kg 时(市场上用于污水处理废气净化的煤质柱状活性炭价格为 1 800 元/t),COD 去除率接近 90%。因此,应用活性炭吸附处理蒸汽状态下的废水的处理效果相较于直接将活性炭投加到废水中的处理效果更好,活性炭的用量也更少,且整个过程无污泥产生。经本研究发现此技术不但从理论分析上可行,而且处理/运行成本低廉、操作便捷。因此,在已有的污泥热干化基础上,采用活性炭吸附法处理蒸汽状态下的废水具有明显优势。

### 3 结论

研究表明污泥干化冷凝废水中高浓度氨氮并不是主要来自聚丙烯酰胺的受热分解,污泥在热干化产生废水蒸汽的过程中采用活性炭吸附可有效降低冷凝水中的 COD、氨氮含量。活性炭添加量为 20 g/L 时,COD 已经能达到 100 mg/L 以下,活性炭添加量为 30 g/L 时,处理后得到的冷凝水中的 COD<50 mg/L(每 g 活性炭吸附去除 COD 的量为 74 mg 左右),达到《污水排放综合标准》(GB 8978-1996)中的一级 A 排放标准,活性炭添加量为 45 g/L 时,处理后得到的冷凝水中的氨氮的去除率能达到 70%以上。

#### [参考文献]

- [1] 胡和平,刘军,罗刚,等. 活性污泥工艺中污泥减量化技术研究进展[J]. 水资源保护,2007, 23(6):32-35.  
Hu Heping, Liu Jun, Luo Gang, et al. Sludge reduction technique in activated sludge technology[J]. Water Resources Protection,2007,23(6):32-35.(in Chinese)
- [2] 王雅婷.城市污水厂污泥的处理处置与综合利用[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(1):90-94.  
Wang Yating. Municipal sewage sludge treatment and disposal and comprehensive utilization[J]. Environmental Science and Management, 2011,36(1):90-94.(in Chinese)
- [3] Kelessidis A, Athanasios S, Stasinakis. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries[J].Waste Management,2012,32: 1186-1195.
- [4] Wang W, Luo Y X, Qiao W. Possible solutions for sludge dewatering in China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China,2010,4(1):102-107.
- [5] Passio L, Rizzo L, Fuchs S. Two-phase anaerobic digestion of partially acidified sewage sludge: a pilot plant study for safe sludge disposal in developing countries[J]. Environmental Technology,2012, 33(18):2089-2095.
- [6] Neyens E, Baeyens J, Creemers C. Alkaline thermal sludge hydrolysis[J].Journal of Hazardous Materials, 2003,97(1/2/3): 295-314.
- [7] Gale P. Land application of treated sewage sludge: quantifying pathogen risks from consumption of crops[J]. Journal of Applied Microbiology,2005, 98(2):380-396.
- [8] Calvo L F, Sánchez M E, Morán A, et al. ITG-MS as a technique for a better monitoring of the pyrolysis, gasification and combustion of two kinds of sewage sludge[J].Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2004,78(2):587-598.
- [9] Shimp G F.Continued emergence of heat drying: a technology update[A]. In: Proceedings 14 annual WEFresidentsand bio-solid management conference[C].USA, 2010:1425-1432.
- [10] 周涛,陈军.城市环境的大问题 污水处理厂处置浅析[J]. 环境保护科学,1998,24(6):11-12.  
Zhou Tao, Chen Jun. An implement project of urban environment:a brief analysis of sludge disposal of wastewater treatment plant[J]. Environmental Protection Science, 1998,24(6): 11-12.(in Chinese)
- [11] 王新,陈涛,梁仁禄,等.污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究[J]. 应用生态学报,2002,13(2):163.  
Wang Xin, Chen Tao, Liang Renlu, et al. Effects of land utilization of sewage sludge on crops and soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2002,13(2):163.(in Chinese)
- [12] 李润东,张万里,孙洋,等. 污泥热干化技术适应性分析及未来发展趋势[J].可再生能源,2012(5):95-99.  
Li Rundong, Zhang Wanli, Sun Yang, et al. Adaptability analysis and future development trend of sludge thermal drying technology[J]. Renewable Energy Resources,2012(5): 95-99. (in Chinese)
- [13] 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):109-114.  
Wu Ligu, 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.
- [14] 李久安,周秋玲,谭周亮. 污水处理厂污泥热干化技术应用及工程设计要点[J]. 水污染防治, 2014, 32(4):27-31.  
Li Jiu'an, Zhou Qiuling, Tan Zhouliang. The technology use and engineering design key points of thermal sludge drying in WWTP[J].Water Pollution Control,2014, 32(4): 27-31.(in Chinese)
- [15] 李安峰,骆坚平,黄丹,等. 污泥干化冷凝水水质特征分析[J]. 环境工程学报, 2015(1):253-256.  
Li Anfeng, Luo Jianping, Huang Dan, et al. Water quality characteristics of condensate from sludge drying process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015(1):253-256.(in Chinese)
- [16] 邹道安,黄瑾,白海龙,等. 污泥热干化和燃烧特性试验研究[J]. 环境污染与防治, 2012(4):5-10.  
Zou Dao'an, Huang Jin, Bai Hailong, et al. Experimental re-

- search on thermal drying and combustion characteristics of sludge[J]. Environmental Pollution & Control,2012(4):5-10. (in Chinese)
- [17] 吴健, 赵明星, 阮文权. A/O-MBR 处理高 COD 和高氨氮餐厨废水试验研究[J]. 工业水处理, 2014, 4(4):66-69.  
Wu Jian, Zhao Mingxing, Ruan Wenquan. Experimental research on the treatment of food wastewater with high concentration of COD and ammonia-nitrogen by A/O-MBR process [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 4(4): 66-69. (in Chinese)
- [18] 曾祥诚. 有机废气处理方法探讨[J]. 科技创新导报, 2009, 35: 155.  
Zeng Xiangcheng. Discussion on organic waste treatment method[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, 35:155.(in Chinese)
- [19] 郝吉明. 大气污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
Hao Jiming. Air Pollution Control Engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.(in Chinese)
- [20] 陈安良, 陶菲. 活性炭吸附的应用研究[J]. 化学工程与装备, 2011(11):164-166.  
Chen Anliang, Tao Fei. Study on application of activated carbon adsorption[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2011, (11):164-166.(in Chinese)
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版, 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and Analytic Methods of Water and Wastewater [M]. 4th ed. Beijing: Environmental Science Press of China, 2002.(in Chinese)
- [22] 李大强. 聚丙烯酰胺絮凝剂对污泥脱水性能的影响[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(8):162-163.  
Li Daqiang. Effect of polyacrylamide flocculant to the function of sludge dewatering[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2012, 18(8):162-163.(in Chinese)
- [23] 丁春生, 缪佳, 秦树林, 等. 臭氧/活性炭/紫外光联用处理几种高浓度有机废水影响因素[J]. 环境科学学报, 2008, 3(3): 496-501.  
Ding Chunsheng, Miu Jia, Qin Shulin, et al. Influencing factors of high-concentration organic waste water treatment by O<sub>3</sub>/UV using granular activated carbon (GAC) as the catalyst [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 3(3):496-501. (in Chinese)
- [24] 张志辉, 郑天龙, 王孝强, 等. 活性炭吸附处理锂电池厂含酯废水及微波再生实验[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 644-649.  
Zhang Zhihui, Zheng Tianlong, Wang Xiaoqiang, et al. The experimental study of activated carbon adsorption and microwave regeneration for the treatment of ester-containing wastewater from lithium-ion battery factory[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 644-649.(in Chinese)
- [25] 易斌, 杨春平, 郭俊元, 等. 活性炭吸附-Fenton 氧化处理高盐有机废水[J]. 环境工程学报, 2013(3):903-907.  
Yin Bin, Yang Chunping, Guo Junyuan, et al. Treatment of organic wastewater with high concentration of salts using coupling process of activated carbon adsorption and Fenton oxidation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013(3):903-907.(in Chinese)
- [26] Zhang M H, Zhao Q L, Bai X, et al. Adsorption of organic pollutants from coking Wastewater by activated coke[J]. Colloids and Surfaces a Physico-chemical and Engineering Aspects, 2010, 362(1/2/3): 140-146.
- [27] 尚会建, 周艳丽, 赵彦, 等. 活性炭催化臭氧氧化处理低浓度氨氮废水[J]. 化工环保, 2012, 5(5):405-408.  
Shang Huijian, Zhou Yanli, Zhao Yan, et al. Treatment of Low-concentration ammonia nitrogen wastewater by catalytic ozonation process with activated carbon[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2012, 5(5):405-408.(in Chinese)