

焦化废水处理技术的研究

田陆峰^{1 2 3}

- (1. 煤炭科学研究总院 北京煤化工研究分院 北京 100013;
2. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室 北京 100013;
3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 北京 100013)

摘要:焦化废水是煤热解干馏、荒煤气回收净化和化产品回收精制等炼焦过程产生的废水的统称,其中含有大量污染物,严重污染环境。较成熟的焦化废水处理技术有物理化学法、生物处理法和化学处理法,分别包括絮凝法、吸附法、烟道气处理法和萃取法;曝气法、反硝化-硝化脱氮法和生物流化床技术;焚烧法、臭氧法、氧气催化氧化法、光催化氧化法、电化学法和 Fenton 试剂法。焦化废水处理技术的核心是生物处理法,工艺流程包括预处理、生化处理、深度处理和废水回用四部分。常用物理化学法进行预处理,深度处理采用理化和理化生化组合工艺。污染低、效率高、成本低的处理工艺能最终实现焦化废水的零排放和水资源的循环利用,满足经济和社会可持续发展的需求。

关键词:焦化废水;物理化学法;生物处理法;化学处理法;工艺流程

中图分类号:X784

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2013)04-0091-05

Technologies for coking wastewater treatment

TIAN Lufeng^{1 2 3}

- (1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute Beijing 100013, China;
2. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control (China Coal Research Institute) Beijing 100013, China;
3. State Key Laboratory of Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources (China Coal Research Institute) Beijing 100013, China)

Abstract: Coking wastewater is produced in coking process of coal pyrolysis carbonization, raw coke oven gas and petrochemical recovery and purification, which contains lots of pollutant and contaminates environment severely. The maturer coking waste processing techniques are physical-chemical, biological and chemical method, which respectively contains flocculence, adsorption, flue gas treatment and extraction method; aeration treatment, denitrification-nitration and biological fluid bed method; burning, ozonation process, oxygen catalytic oxidation method, electro-chemical process and Fenton reagent method. The core is biological treatment, and its technological process is comprised of pretreatment, biochemical treatment, advanced treatment and wastewater reuse. The physical-chemical method is usually used in pretreatment, and physical-chemical process and physical-chemical-biological group technology are used in advanced treatment. The technological process, which is clean, efficient and low-cost, can realize zero release of coking wastewater and recycle of water resources to meet the demands of sustainable development of economy and society.

Key words: coking wastewater; physic-chemical method; biological treatment; chemical treatment; technological process

收稿日期:2013-04-24 责任编辑:孙淑君

作者简介:田陆峰(1985—),女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士,助理工程师,主要从事煤炭热解与节能环保等技术研究工作。E-mail: tly850706@163.com。

引用格式:田陆峰. 焦化废水处理技术的研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(4): 91-95, 104.

0 引言

焦化废水是来源于焦化厂炼焦过程中各环节废水的统称,主要包括煤热解干馏阶段、荒煤气回收净化阶段和化产品回收精制阶段。焦化废水中组分多且复杂,含有大量的芳香类高浓度难降解的有机污染物和硫、氮、磷等无机盐污染物,这些污染物的浓度和色度较高、毒性极大,不仅严重污染环境,还对人类健康和动植物生长造成巨大危害,因此开发高效易行的焦化废水净化处理技术,切实解决炼焦行业的污染问题,一直是炼焦化学工业可持续发展需要重视的问题。

2012-06-27 中国环境保护部发布了《炼焦化学工业污染物排放标准》(GB 16171—2012),该标准不仅对焦化废水中各主要污染物提出了更加严格的排放要求,而且增加了总氮、苯、多环芳烃和苯并芘(BaP)等硬性指标,同时对单位产品排水量做了更加严格的要求,因此焦化废水处理技术的研究与发展迫在眉睫。

1 焦化废水处理技术分类

目前较成熟的焦化废水处理技术主要有物理化学法、生物处理法和化学处理法,因焦化废水污染物浓度高、处理量大,目前多数处理技术仍局限于实验室研究阶段或中试阶段,尚未进入工业应用阶段。

1.1 物理化学法

物理化学法即针对焦化废水中不同污染物的特性,运用物理化学原理脱除特定污染物,该类处理技术具有设备简单、去除率高、数据稳定等优势,在国内外应用较多。

1.1.1 絮凝法

絮凝法是运用胶体的性质去除焦化废水中的污染物,絮凝剂在水中发生化学反应,生成氢氧化物胶体,胶体大分子所带电荷与污染物表面电荷相反,发生电荷异性相吸中和反应,将污染物包裹并沉降,达到废水净化目标。絮凝法能有效降低焦化废水的COD和色度,且处理费用低,可以间歇应用也可以连续应用,常用于焦化废水的深度处理。

絮凝法的最佳条件参数由絮凝剂的投加量和体系pH值决定^[1]。国内常用聚合硫酸铁作絮凝剂,聚丙烯酰胺作助凝剂^[2],常用的铁盐絮凝剂对焦化废水中COD和浊度处理效率高,但对色度的降

低效果不理想。聚合氯化铝与聚丙烯酰胺复配的复合絮凝剂^[3]可使色度去除率达80%,开发高效的絮凝剂和技术联用是絮凝法研究的热点^[4]。

1.1.2 吸附法

吸附法处理焦化废水是利用多孔吸附剂较大的比表面积,产生较强的表面能,去除废水中的污染物,降低焦化废水的污染负荷。常用吸附剂有天然矿物如膨润土和沸石,活性炭材料如活性炭,工业固废如粉煤灰和熄焦粉等。

活性炭是由碳材料经高温炭化活化制得的疏水性非极性吸附剂,含有大量的微孔和中孔,吸附性能很强,常在生化处理段之前或深度处理段使用。活性炭对多环芳烃和氮杂环等有机污染物有很好的吸附效果^[5],出水的色度、酚含量和氰化物含量能达标排放^[6],其缺点是无法循环使用,提高了处理成本,今后研究的重点是如何脱附和循环使用^[7]。

粉煤灰的主要成分是二氧化硅、硅酸铝钠等,脱色效果好,COD、挥发酚、油等去除率高,廉价易得,常用于焦化废水的深度处理,其机理符合Freundlich吸附等温式^[8]。膨润土主要组分是蒙脱石,具有良好的阳离子交换性能和高比表面积等。沸石对焦化废水中氨氮有较好的吸附性能^[9],粒度越细对焦化废水氨氮的去除率越高。熄焦粉廉价易得、不用粉碎,有效降低投资费用,吸附后的熄焦粉可用作配煤炼焦瘦化剂,减少二次污染。

除上述几种常用的吸附剂外,还有一些并不常用但吸附效果好的吸附新技术,如海藻酸钠-腐植酸铀吸附法^[10],磺化褐煤吸附法^[11],煤基多孔材料吸附剂^[12]等。

1.1.3 烟道气处理法

专利技术“烟道气处理焦化剩余氨水或全部焦化废水的方法”^[13]已有效应用于江苏淮钢集团焦化剩余氨水处理工程中。烟道气处理法是将废水中的污染物,主要是有机污染物以固化状态与废水分离,而废水中的水分全部汽化,不仅实现了焦化废水的零排放,而且通过有效脱硫实现了外排烟道气的达标排放,工艺流程如图1所示。

1.1.4 萃取法

萃取法是利用焦化废水中各组分在萃取剂中溶解度不同的原理实现对各组分的分离。该法主要用于对焦化废水中酚类化合物的提取和回收,工艺流程如图2所示,常用的萃取剂对酚的分配系数

低、损耗大、二次污染严重,改进的络合离心萃取法^[14]和膜萃取技术^[15]可有效提高萃取效率和经济效益。

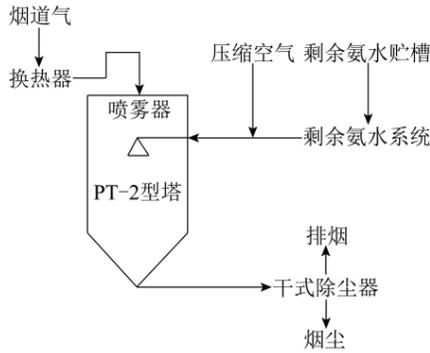


图1 锅炉烟道气处理焦化剩余氨水工艺

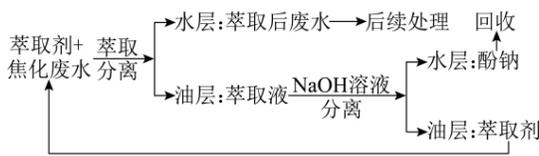


图2 萃取法分离焦化废水中酚

1.2 生物处理法

生物处理技术是基于活性微生物降解的方法,将废水中的污染物氧化为可被微生物吸收和代谢的小分子,达到净化废水的目的,具有处理量大、应用范围广、投资费用少的优势。

1.2.1 曝气法

曝气法是一种好氧微生物处理废水技术,广泛应用于对焦化废水的处理中^[16]。在大面积的曝气池中,污染物与活性污泥中的微生物充分接触,将不溶性的污染物氧化降解为可溶性有机物,被微生物细胞体吸附,作为营养物质吸收代谢,产物主要为CO₂,无二次污染,曝气法处理流程如图3所示。

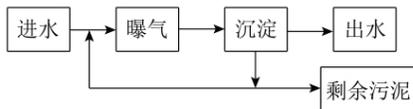


图3 活性污泥法处理焦化废水

1.2.2 反硝化-硝化脱氮法

实验研究表明,反硝化-硝化技术能有效降低焦化废水的COD和氨氮含量,出水达到国家二级或三级排放标准^[17]。在实际应用中有厌氧段(A)和好氧段(O)的多级组合,国内常用的有A/O、A/A/O、O/A/O等,存在总氮去除率低、菌群繁殖慢、投资费用低等缺点。基于短程硝化-反硝化的O₁/A₁/O₂/A₂

新工艺能有效解决氨氮、COD、挥发酚和氰达标问题^[18],具有良好的推广前景。

1.2.3 生物流化床技术

生物流化床处理技术具有活性污泥法的高效性和生物膜法的高耐受性等优点,近年来常用于对含酚废水的处理^[19]。生物流化床是以砂、焦炭或活性炭等颗粒为载体,在其表面生长和附着生物膜,被处理的废水自下向上流动,载体颗粒处于流动状态。

1.3 化学处理法

1.3.1 焚烧法

从20世纪50年代开始应用焚烧法处理废水,在高温燃烧炉内废水呈雾状喷入并完全汽化,有机物氧化分解为完全燃烧产物CO₂、H₂O以及无机物灰渣。焚烧法对高浓度焦化废水的处理效率高,没有二次污染,但投资较高,在中国使用不多。

1.3.2 臭氧法

臭氧法是应用臭氧将焦化废水中各类污染物高效氧化为无害物质,达到除臭、脱色、杀菌的效果。过量的臭氧在水中分解为O₂,不造成二次污染,其处理流程如图4所示。该方法存在投资高、耗电大等缺点,而且对操作的要求严格,以防臭氧泄露对周围环境造成危害。美国近年将臭氧法应用到焦化废水的处理中,主要用于深度处理段^[20]。

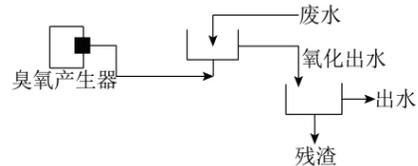


图4 臭氧法工艺流程

1.3.3 氧气催化氧化法

氧气催化氧化法是指以O₂为氧化剂,经特定催化剂催化,在高温和高压实验条件下,将废水中溶解或悬浮的有机污染物和含氮硫的化合物氧化为N₂、CO₂和H₂O^[21]。该法具有二次污染低等优势,是焦化废水的清洁处理工艺,技术关键是研发高稳定性催化剂^[22]。

1.3.4 光催化氧化法

光催化氧化法是利用氧化剂在光敏化半导体催化剂作用下经光照射产生的强氧化性活性物种,将焦化废水中的污染物氧化为无害物质^[23]。光催化氧化法常用的催化剂是二氧化钛,适合于低浊

度、透光性好的焦化废水体系的深度处理。

1.3.5 电化学法

电化学法是利用电化学反应来降解焦化废水。某些污染物可以直接在电解池中发生电化学反应,参与电解过程,而某些污染物则被电解过程中产生的活性氧化物氧化为无害化合物。该法处理效率高,但能耗大。近年来改进的新技术有掺硼金刚石膜电极^[24]、离子膜辅助电催化氧化^[25]和阳极氧化/阴极电 Fenton 协同电催化^[26]等。

1.3.6 Fenton 试剂法

Fenton 试剂由 H_2O_2 和 Fe^{2+} 混合制得,在处理焦化废水时的作用有:①强氧化作用,经 Fe^{2+} 催化, H_2O_2 分解为具有强氧化性的羟基自由基;②氧化速率快,由 H_2O_2 的快速分解性质决定;③絮凝作用,产物氢氧化铁和氢氧化亚铁具有胶体性质。应用零价铁替代 Fe^{2+} 做催化剂,可提高焦化废水处理效率并降低费用^[27]。此外,微波-Fenton 法、UV-Fenton 法和电-Fenton 法等联用技术^[28]逐渐成为研究重点。

除上述介绍的三大类焦化废水处理技术外,近年来,部分有机污水处理新技术也被应用于焦化废水的降解,如等离子体技术^[29]、超声波技术^[30]、微波辐照法、超滤-纳滤法等,均取得了较理想的处理效果。

2 焦化废水处理工艺流程

针对焦化废水复杂的水质特点,很难采用单一传统工艺达到综合治理的目的。焦化废水处理技术的核心是生物法,生物法与化学法和物化法相结合的工艺,能使焦化废水达到更好的处理效果。如 A^2/O -臭氧氧化-活性炭过滤组合工艺^[31],有效实现了对焦化废水生化性的改善,工艺流程如图 5 所示。

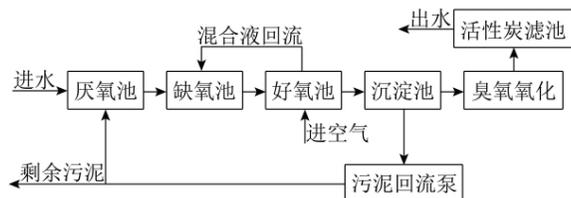


图5 A^2/O -臭氧氧化-活性炭过滤组合工艺

处理焦化废水的工艺流程主要包括预处理、生化处理、深度处理和废水回用四部分。处理工艺流

程如图 6 所示。常采用物化法对焦化废水进行预处理,主要去除固体颗粒及悬浮物,除氨、除油和脱酚等,避免在下级生化处理段中对微生物的抑制和毒害,降低生化处理的污染负荷,并根据焦化废水水质特点回收化工产品。

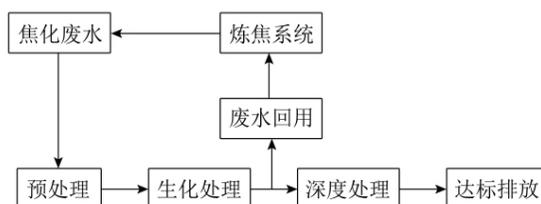


图6 焦化废水处理工艺流程

现有的生化处理技术难以达到焦化废水的 COD 和氨氮排放指标,一般采用组合生化工艺处理焦化废水,主要有:①两段生物法,即 AB 法,采用两段串联的生化处理工艺,可有效降低出水污染物浓度;②延迟曝气法,即完全氧化活性污泥法,曝气时间延长至 24 h 甚至更长,微生物可以充分降解大分子有机物,有效降低出水中酚、氰化物的浓度;③厌氧-好氧工艺,即 A/O 法,将焦化废水中的微生物分为好氧和厌氧 2 种类型;④SBR 法,即间歇式活性污泥法,相对简化了传统活性污泥法的工艺流程,有利于氮磷的脱除;⑤MBR 生物膜法,是膜分离技术与传统废水分离器有机组合的一种新型高效污水处理系统,用过滤膜取代传统生化技术中二次沉淀池和沙滤池,降低建设成本。

由于环保要求日益严格,国内外对焦化废水深度处理和回用技术的研究显著增加,单纯的物化法、生物法或化学法处理技术很难实现焦化废水的达标排放与废水回用,焦化废水深度处理段大多采用理化和理化生化组合工艺。焦化废水处理的最高目标是实现焦化废水零排放,同时解决水资源短缺和污染问题,满足经济和社会可持续发展的需求。

3 结 语

焦化废水处理技术受限于三方面因素:出水品质、运行费用和二次污染。目前现有的焦化废水处理技术很难完全突破这三方面因素的制约。在今后焦化废水处理技术的研究中,首先,应考虑运用多法联用技术,将不同原理的处理工艺有效结合,优势互补,提高焦化废水的处理效率;其次,有针对

性地改进已有处理技术和设备,拓宽焦化废水处理技术的适用范围,为实现工业化推广服务;最后,在基础理论研究基础上,根据焦化废水组分的复杂性及焦化废水处理技术的瓶颈问题,继续研发适合焦化废水的新型处理技术,实现工业废水的根本治理。

总之,焦化废水处理技术及工艺要符合当前生态环境可持续发展战略以及经济和社会发展的需求,通过污染低、效率高、成本低的废水处理工艺,最终实现焦化废水的零排放和水资源的循环利用。

参考文献:

- [1] Lai Peng, Zhao Huazhang, Wang Chao, et al. Advanced treatment of coking wastewater by coagulation and zero-valent iron processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(1/2): 232-239.
- [2] 赵玲, 吴梅. 混凝澄清在焦化废水处理中的应用 [J]. *冶金动力*, 2003(3): 61-62.
- [3] 程胜宇. 焦化废水混凝后处理研究 [J]. *山西能源与节能*, 2012(5): 51-52.
- [4] 雷霆, 赵文涛, 黄霞, 等. 混凝联合 O_3 、 O_3 /UV 深度处理焦化废水的研究 [J]. *中国给水排水*, 2010, 26(5): 100-103.
- [5] 胡记杰, 肖俊霞, 任源, 等. 焦化废水原水中有机污染物的活性炭吸附过程解析 [J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1567-1571.
- [6] Zhang Mohe, Zhao Quanlin, Bai Xue, et al. Adsorption of organic pollutants from coking wastewater by activated coke [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 362(1/2/3): 140-146.
- [7] Guo Dongsheng, Shi Qiantao, He Binbin, et al. Different solvents for the regeneration of the exhausted activated carbon used in the treatment of coking wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2/3): 1788-1793.
- [8] 刘心中, 姚德, 董凤芝, 等. 粉煤灰在废水处理中的应用 [J]. *化工矿物与加工*, 2002(8): 4-7.
- [9] 张文成. 沸石吸附焦化废水中氨氮的研究 [J]. *能源环境保护*, 2005, 19(5): 9-11, 15.
- [10] 李国清, 罗生全. 海藻酸铈-腐殖酸铈吸附法处理重金属废水的研究 [J]. *集美大学学报: 自然科学版*, 2007, 12(3): 226-231.
- [11] 罗道成, 刘俊峰, 李忠远. 用磺化褐煤处理含铬(VI)废水的研究 [J]. *煤化工*, 2010, 38(2): 36-38.
- [12] 王莉萍, 宋晓曼, 崔平. 煤基多孔炭材料的制备及其处理焦化废水的研究 [J]. *燃料与化工*, 2007, 38(3): 47-49.
- [13] 程志久, 殷广瑾, 杨丽琴, 等. 烟道气处理焦化剩余氨水的研究 [J]. *环境科学学报*, 2000, 20(5): 639-641.
- [14] 崔秋生, 柴高贵, 郭建光, 等. 络合离心萃取法在高浓度含酚废水处理中的应用 [J]. *煤化工*, 2009, 37(1): 42-44.
- [15] 殷国监. 硅橡胶膜萃取处理高浓度含酚废水 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [16] Felföldi T, Székely A J, Gorál R, et al. Polyphasic bacterial community analysis of an aerobic activated sludge removing phenols and thiocyanate from coke plant effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(10): 3406-3414.
- [17] 陈长松, 李天增, 张宝林, 等. A/O 工艺处理焦化废水的工程实践 [J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(10): 85-87.
- [18] 杨志林, 王开春, 张彬彬, 等. $O_1/A_1/O_2/A_2$ 工艺处理焦化废水试验研究 [J]. *水处理技术*, 2012, 38(9): 79-87.
- [19] 张伟, 韦朝海, 彭平安, 等. A/O/O 生物流化床处理焦化废水中酚类组成及降解特性分析 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4(2): 253-258.
- [20] Chang E E, Hsing H J, Chiang P C, et al. The chemical and biological characteristics of coke-oven wastewater by ozonation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 156(1/2/3): 560-567.
- [21] Liou R M, Chen S H. CuO impregnated activated carbon for catalytic wet peroxide oxidation of phenol [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1): 498-506.
- [22] Zhao Guohua, Lu Baoying, Jin Y, et al. P-chlorophenol wastewater treatment by microwave-enhanced catalytic wet peroxide oxidation [J]. *Water Environment Research*, 2010, 82(2): 120-127.
- [23] Akpan U G, Hameed B H. Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO_2 -based photocatalysts: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170(2/3): 520-529.
- [24] Zhu Xiuping, Ni Jinren, Lai Peng. Advanced treatment of biologically pretreated coking wastewater by electrochemical oxidation using boron-doped diamond electrodes [J]. *Water Research*, 2009, 43(17): 4347-4355.
- [25] 朱立, 赵玉明, 陈飞. 离子膜辅助电催化氧化法预处理焦化废水的研究 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(12): 9-12.
- [26] 李海涛, 李鑫钢, 李玉平, 等. 阴阳极协同作用电催化深度处理焦化废水 [J]. *化工进展*, 2009(52): 98-102.

(下转第 104 页)

2) 锅炉运行时,控制燃烧以保证烟气温度和含氧量在额定范围内运行^[15]。

5 结 论

1) 脉冲喷吹式除尘器占地面积相对较小,一次性投资较少,对喷吹系统的加工工艺,喷吹系统及滤袋的安装精度要求较高,同时更换滤袋时需反复拆装喷吹系统,很容易因安装不当造成偏吹从而影响滤袋寿命。所以适用于运行负荷较小或运行频率不高,布袋除尘器工作负荷不高的煤粉锅炉系统中。

2) 气箱式脉冲除尘器需要一定量的压缩空气压力,且滤袋尺寸相对固定,若要增加过滤面积只能通过增设箱体、增加滤袋数量的方式,相对占地面积较大,一次性投资较高,但在后期使用维护中,可以做到不停机检修,并且对整体系统影响很小,维护成本和精度要求较低。适用于锅炉长期高负荷运转,布袋负荷较高的煤粉锅炉系统中。

3) 要保持滤料性能,需要在锅炉系统运行中,控制烟气温度和含氧量均在额定范围内波动,检修维护或运行季结束时,应对滤袋进行清理保养。而脉冲喷吹除尘器,不仅要在生产安装时保证其精度,在运行中也要检查气路系统是否干净,避免气路系统进入杂质损坏滤袋。

参考文献:

[1] 纪任山,王乃继,肖翠微,等. 高效煤粉工业锅炉技术现状及应用[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(5): 52-56.
 [2] 余云进. 除尘技术问答[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
 [3] 张殿印,张学义. 除尘技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.

(上接第95页)

[27] Chu Libing, Wang Jianlong, Dong Jing, et al. Treatment of coking wastewater by an advanced Fenton oxidation process using iron powder and hydrogen peroxide [J]. Chemosphere 2012, 86(4): 409-414.
 [28] Zhu Xiaobiao, Tian Jingping, Liu Rui, et al. Optimization of Fenton and electro-Fenton oxidation of biologically treated coking wastewater using response surface methodology [J]. Separation and Purification Technology, 2011, 81(3): 444-450.

[4] 陈隆枢. 脉冲喷吹装置的清灰特性及相关技术[C]//全国袋式过滤技术研讨会论文集. 厦门: 中国环保产业协会袋式除尘器委员会, 2005: 252-259.
 [5] 毛志伟, 胡建鹏. 气箱脉冲袋收尘器的开发研究和应用[C]//全国袋式过滤技术研讨会论文集. 杭州: 中国环保产业协会袋式除尘器委员会, 1994: 127-136.
 [6] 韦鸣瑞, 陈志炜, 刘晨. 燃煤电厂锅炉袋式除尘技术与工程应用[C]//全国袋式过滤技术研讨会论文集. 厦门: 中国环保产业协会袋式除尘器委员会, 2005: 6-11.
 [7] 江得厚, 郝党强, 王勤. 燃煤电厂袋式除尘器发展趋势及其运行寿命的音响因素[J]. 中国电力, 2008(5): 86-91.
 [8] GB/T 6719—2009 袋式除尘器技术要求[S].
 [9] 杨复沫. 脉冲袋式除尘器清回能力评价方法和手段的实验研究[D]. 北京: 冶金部安全环保研究院, 2009.
 [10] 胡国忠. 袋式除尘器在国外电站 CFB 锅炉烟气除尘上的应用的研究[C]//全国袋式过滤技术研讨会论文集. 杭州: 中国环保产业协会袋式除尘器委员会, 1999: 208-212.
 [11] 刘亚洲, 王自宽. 内蒙古丰泰发电有限公司 2X200MW 机组袋式除尘器使用情况介绍[C]//全国袋式过滤技术研讨会论文集. 厦门: 中国环保产业协会袋式除尘器委员会, 2005: 12-20.
 [12] 毛健雄, 毛健全, 赵树民. 煤的洁净燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
 [13] 罗祥波, 王顺. PPS 滤料在火电厂燃煤锅炉烟气除尘中的应用[C]//全国袋式过滤技术研讨会论文集. 厦门: 中国环保产业协会袋式除尘器委员会, 2005: 215-220.
 [14] 姚宇平. 袋式除尘器滤料及脉冲喷吹技术探讨[C]//全国袋式过滤技术研讨会论文集. 厦门: 中国环保产业协会袋式除尘器委员会, 2005: 197-201.
 [15] 徐尧, 张鑫, 梁兴, 等. 袋式除尘器滤袋失效原因分析及预防措施[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(6): 112-115.
 [29] Ren Hongqiang, Yang Yunjun, Ding Lili, et al. Method integrating electrochemical oxidation and flocculation processes for pretreatment of coking wastewater: USA, 20110220585 [P]. 2001-09-15.
 [30] 陈振飞, 卢桂军, 李茂静, 等. 超声波技术降解焦化废水中有机的研究[J]. 工业水处理, 2011, 31(4): 39-42.
 [31] 武思拓. 组合工艺处理难降解焦化废水试验研究[J]. 广东化工, 2012, 10(39): 144-145.