

节能减排

煤化工废水处理技术进展及发展方向

陆小泉^{1,2}

(1. 中国煤炭科工集团有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘要:煤化工产业快速发展带来了水污染的问题,能否有效处理煤化工废水关系到我国煤化工产业的健康发展。介绍了煤焦化、煤气化和煤液化加工工艺废水的特点,分析了国内外煤化工废水预处理、生化处理和深度处理等方面的技术进展,展望了煤化工废水处理技术的发展方向。研究结果表明,通过多种处理技术的优化组合,能够实现煤化工废水达标排放;由于煤化工废水组分的复杂性,以高级氧化、膜分离为代表的深度处理技术将是今后发展的重点;降低处理成本、提高处理效率也是煤化工废水处理技术发展的必然趋势。

关键词:煤化工;废水处理;生化处理;深度处理

中图分类号:X784 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2016)04-0126-06

Progress and development of coal chemical industrial wastewater treatment technologies

LU Xiaoquan^{1,2}

(1. China Coal Technology and Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Rapid development of coal chemical industry brought water pollution problem. The effectiveness of treatment of coal chemical industrial wastewater could determine the healthy development of coal chemical industry in China. In this paper, the characteristics of wastewater coming from coal coking, coal gasification and coal liquefaction process were introduced. The development of wastewater treatment technologies, both at home and abroad, such as pretreatment, biochemical treatment and advanced treatment, was discussed, and the development of coal chemical wastewater treatment technologies was also prospected. Many scholars' studies showed that, the coal chemical industrial wastewater could meet the discharge standards through the proper combination of a variety of processing technology. The advanced treatment technology, such as advanced oxidation, membrane separation, was the focus of future development, as the difficult treatment of the complexity of coal chemical industry wastewater. In addition, reducing processing costs and improving processing efficiency were the inevitable trend of the coal chemical industrial wastewater treatment technologies.

Key words: coal chemical industry; wastewater treatment; biological treatment process; advanced treatment process

0 引言

煤化工废水产量巨大,废水中含有大量酚氨、烷烃、芳烃等有毒有害物质,是一种高浓度难生物降解的工业废水,水质可生化性差,处理难度极大。煤化工项目集中分布在水资源稀缺的陕西、新疆、内蒙古

等煤炭主产区,这些地区水资源占有量不到全国总量的20%,水环境容量严重不足,煤化工产业快速发展导致该区域面临地下水过度开采和水环境严重污染的危险。国家对新建煤化工项目的废水排放政策进一步收紧,要求废水回用率在95%以上并最终达到“零排放”标准。煤化工废水处理不仅关系到

收稿日期:2016-04-19;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.04.026

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050501);北京市科委重大科技成果转化落地培育资助项目(Z151100002815027)

作者简介:陆小泉(1982—),男,江苏仪征人,助理研究员,硕士,研究方向为煤气化、煤化工废水处理。E-mail:luxiaoquan@ccteg.cn

引用格式:陆小泉.煤化工废水处理技术进展及发展方向[J].洁净煤技术,2016,22(4):126-131.

LU Xiaoquan. Progress and development of coal chemical industrial wastewater treatment technologies[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4): 126-131.

我国煤化工产业的健康发展,也是我国煤炭资源实现向原料和燃料并重转型升级的瓶颈。本文阐述了国内外煤化工废水处理技术的研究进展,并对煤化工废水处理技术进行了展望,以期为煤化工废水处理的研究提供参考。

1 不同煤化工工艺废水特征

根据煤焦化、煤气化、煤液化等生产工艺和用水目的的不同,各阶段煤化工废水的排放量、组成差异很大。

1.1 煤焦化废水

煤焦化是指煤炭在隔绝空气和高温加热的条件下,受热分解生成煤气、焦油、粗苯和焦炭的过程。在炼焦、煤气净化、焦油及粗苯加工精制等过程中容易产生含有酚、氨及大量有机物的工业废水,排放量大,成分复杂^[1]。以武钢焦化公司焦油车间蒸馏氨水废水水质特性为例,废水中化学需氧量(COD)平均含量为19 302 mg/L,挥发酚含量1 854 mg/L,氨氮含量1 457 mg/L,油含量11 286 mg/L^[2]。同时含有含氮硫类杂环化合物和苯系物、多环芳烃等。煤焦化废水水质易受煤质和炼焦工艺影响,废水达标处理的难度较大。

1.2 煤气化废水

煤气化是以煤或煤焦为原料,在一定的温度和压力条件下,将煤或煤焦与氧气、水蒸气等气化剂反应转化为水煤气的过程。应用较多的主要有碎煤加压气化、粉煤气化和水煤浆气化工艺,不同气化工艺产生气化废水的水质、水量差异较大。碎煤加压气化废水^[3]污染物浓度高,污染物成分复杂,废水中COD浓度为3 000~5 000 mg/L,同时含有挥发酚、氨氮及少量的苯系物、芳环化合物等难降解物质,B/C(BOD/COD,生化需氧量/化学需氧量)值小于0.3,可生化性较差。水煤浆气化废水^[4]有机物浓度低,COD浓度在500 mg/L左右,B/C值大于0.5,可生化性较好,但总溶解性固体物质(TDS)浓度大于3 000 mg/L,Cl⁻浓度在500 mg/L左右。粉煤气化废水COD浓度与水煤浆气化废水大致相同,但TDS浓度大于10 000 mg/L,Cl⁻浓度2 000~3 000 mg/L。煤气化废水是典型的高浓度难降解有机废水。

1.3 煤液化废水

煤液化包括煤的直接液化和间接液化2种工艺,是以煤为原料生产汽柴煤等油品的煤炭转化技

术。煤液化废水主要来源于液化、加氢精制、加氢裂化等操作过程中产生的含酚、含氨氮等工业废水,成分复杂,可生化性差。以神华煤直接液化项目为例,液化废水中挥发酚浓度50 mg/L,COD浓度为2 000~5 000 mg/L,氨氮浓度100~350 mg/L,油浓度500 mg/L,且其中包含有大量的苯系物、杂环化合物、多环芳烃等^[5]。煤液化废水具有油含量大,乳化程度高,难以生物降解的特点。

2 煤化工废水处理技术

目前,国内外煤化工废水处理大多采用预处理、生化处理、深度处理三段处理工艺。

2.1 预处理

预处理的主要目标是实现废水中的酚、氨类物质回收,降低含油量,提高废水的可生化性,以达到后续生化处理允许的进水水质指标。

2.1.1 酚的回收

回收酚的方法有溶剂萃取法和蒸汽吹脱法。蒸汽吹脱法采用碱液吸收废水中直接蒸出的挥发酚,形成酚钠盐溶液,再经中和与精馏回收废水中的酚,蒸汽吹脱法具有工艺简单,经济实用的优点。溶剂萃取法利用酚在萃取溶剂与水中的分配系数的不同,实现酚的转移。通常采用分配系数高、与水不互溶、安全低毒的萃取溶剂。Chen等^[6]研究了甲基异丁基酮+酚+水、甲基异丁基酮+对苯二酚+水2种液液三相平衡体系的脱酚效果,认为甲基异丁基酮萃取对苯酚的效率要高于甲基丁基酮。陈赞等^[7]提出了处理鲁奇加压气化工艺产生的煤气化废水的新流程,采用酸水汽提塔同时脱除煤气化废水中的氨气和酸性气体,可将煤气化废水pH值降低至7以下。与二异丙醚相比,萃取溶剂甲基异丁基甲酮对单元酚和多元酚萃取效果更好。

2.1.2 氨的回收

氨的回收主要采用水蒸汽汽提-蒸氨的方法,可按热源是否与氨水接触分为直接蒸氨和间接蒸氨法。基本工艺流程为采用磷酸铵溶液吸收经汽提而析出的可溶性氨气,得到富氨溶液经汽提器汽提,使磷酸铵溶液与氨气分离,达到磷酸铵溶液再生与氨气回收的目的。Li等^[8]采用膨胀颗粒污泥床反应器能显著提高出水水质,降低废水的COD含量,同时将污染物分解为小分子气体。孟祥清等^[9]在氨汽提段采用径向侧喷膜喷射塔板,侧线抽出14.3%

(以总进料量计)汽相氨,控制三级分凝过程的温度和压力条件,获得了高浓度的氨气产品。

2.1.3 除油

不同的煤化工工艺废水中含有的浮油含量并不相同,煤焦化及液化废水中含油量较高,气化废水中含油量相对较低,主要是有机溶剂溶解的苯酚之类的芳香族化合物造成的。煤化工废水的含油量是影响生化处理效果的重要因素之一,生化处理时废水中含油量不宜超过 100 mg/L,预处理时需进行除油。常用的除油方法有隔油、气浮、电解、离心分离等。通过隔油池和气浮法组合,不仅可以回收浮油,还可以起到预曝气的作用^[10]。

2.2 生化处理

生化处理是利用微生物的新陈代谢作用,使废水中的有机污染物转化为 CO_2 、水等无害物质,以实现废水净化的方法^[11]。常用的生化处理工艺主要有 A/O 及 A^2/O 工艺、MBBR 法、PACT 法、厌氧生物处理法等。

2.2.1 A/O 及 A^2/O 工艺

A/O 及 A^2/O 工艺是将厌氧段(A段)与好氧段(O段)串联组合进行水处理的工艺,应用较为广泛。厌氧段提高了废水的可生化性,同时将有机污染物进行氨化游离出氨;好氧段利用好氧微生物的新陈代谢将废水在有氧条件下进行硝化反应,使氨氮转化成硝酸盐,泥水单独回流到缺氧池进行反硝化反应,将硝态氮还原为氮气。工艺较传统生物脱氮法流程短、造价低,但脱氮率相对较低。崔崇威等^[12]研究了水解酸化-缺氧-好氧组合生物处理工艺处理煤气化废水,处理效果比除油-脱酚-蒸氨-三段活性污泥生物处理工艺好。滕济林等^[13]采用粉末活性焦强化 A^2/O 工艺处理煤气化废水,COD、氨氮、总氮的去除率分别为 97.4%、98.1% 和 80.5%。Zhang 等^[14]考察了 A/O 法生化处理过程中活性污泥恶化的影响因素,认为温度也是影响 COD 脱除效率的重要因素,A/O 法处理焦化废水时,水温应控制在 30℃ 以下。

2.2.2 MBBR 法

MBBR 法(移动床生物膜反应器)结合了流化床和生物接触氧化法的优点,是一种新型、高效的废水处理方法。悬浮填料是 MBBR 反应器的核心部分,能与污水频繁接触。在曝气池中,悬浮填料作为微物的活性载体,依靠曝气池内的曝气和水流的提升作用而处于流化状态,增大了生物膜与废水的接

触面积,提高了废水处理效率。MBBR 法无需活性污泥回流或循环反冲洗,具有占地少、有机负荷高、耐冲击负荷能力强、出水水质稳定等优点。Ratcliffe 等^[15]研究了 Sasol 煤制油工艺,取得了很好的效果。Li 等^[16]采用 MBBR 法处理鲁奇固定床气化废水,COD 含量降低 81%,酚及氨的含量分别降低了 89%、93%,对硝化细菌的抑制作用也非常明显。Jia 等^[17]对 MBBR 法进行了改进,处理气化废水时可将 COD 含量在原有基础上再降低 6%,系统稳定运行 50 d,跨膜压力比改进前下降了 34%。

2.2.3 PACT 法

PACT 法是在生化进水中投加粉末活性炭(PAC),利用粉末活性炭吸附溶解氧和有机物,在曝气池中进行微生物分解的污水处理工艺。由于巨大的比表面积和很强的吸附能力,活性炭可以吸附废水中大量的污染物和有毒物质,将污染物的水力停留转化为固体停留以延长生化反应时间,同时避免有毒物质对微生物的毒害,保证了废水处理的稳定,工艺中的活性炭可循环利用。PACT 法活性炭吸附处理 COD 的动态吸附容量为 100% ~ 350%,处理难生物降解污染物的效果比较好。Zhao 等^[18]将 PACT 法运用到生物短程脱氮工艺中,将系统总氮脱除效率由 43.8% ~ 49.6% 提高到了 68.8% ~ 75.8%。陈莉荣等^[19]采用 PACT 法处理煤制油低浓度含油废水,试验数据显示,PACT 对 COD、SS(固体悬浮物)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、油的平均去除率分别为 75%、62%、59%、78%,出水水质达到了污水综合排放的一级标准。

2.2.4 厌氧生物处理法

厌氧生物处理法则是一个还原过程,通过还原作用可以将单环、多环有机物开环,使得大分子化合物降解为小分子有机物,提高了废水的可生化性。厌氧生物处理法主要有外循环厌氧反应床(EC)^[20]、上流式厌氧污泥床(UASB)^[21-22]、膨胀颗粒污泥床反应器(EGSB)^[8]等。Li 等^[8]采用高级厌氧膨胀颗粒污泥床处理煤气化废水,废水的 COD 含量由 1 400 mg/L 降至 800 mg/L,总酚含量由 320 mg/L 降至 200 mg/L,挥发酚含量由 150 mg/L 降至 40 mg/L。袁敏^[23]采用两级中温厌氧工艺对煤化工废水进行处理,进水 COD 和总酚浓度为 2 500 mg/L 和 525 mg/L 左右,系统对其去除率分别达到 50% 和 48% 以上。

2.3 深度处理

经过生化处理后,煤化工废水中仍含有部分难降解的杂环化合物,生化出水仍不能保证达到回用的要求,通常需要进行深度处理。常用的深度处理方法有混凝、吸附、高级氧化和膜分离技术等。

2.3.1 混凝法

混凝法是指向废水中投加一定剂量的混凝剂,使废水中的胶体和细微悬浮物在混凝剂的作用下凝聚成絮凝体或颗粒并沉降,达到降低废水的浊度和色度、除去胶体和细微悬浮物的目的。混凝技术包括凝聚和絮凝2个过程。混凝法技术成熟,应用广泛,缺点是对废水的pH要求较高。常用的混凝剂有金属盐无机混凝剂和有机高分子混凝剂等。高亚楼等^[24]研究了不同混凝药剂对气化废水的处理效果,确定了最佳药剂组合和投加量,COD和SS的去除率分别为41.8%和71.5%。

2.3.2 吸附法

吸附法主要利用多孔性固体吸附剂的物理吸附和化学吸附性能除去废水中污染物的过程,根据吸附原理的不同可分为物理吸附、化学吸附和离子交换吸附3种类型。吸附法核心是吸附剂,适宜处理固体颗粒污染物含量较高的废水,但吸附剂高昂,成本及再生处理问题限制了其大规模应用。常见的吸附剂有活性炭、焦炭、沸石、树脂、炉渣、熄焦粉等。尹连庆等^[25]提出了采用褐煤活性焦对煤制气生化废水进行吸附深度处理的方法,确定了最佳投加量、操作pH值、吸附时间等参数,出水COD浓度小于50 mg/L,满足GB 18918—2002《城市污水处理厂污染物排放标准》中一级A排放标准。

2.3.3 高级氧化法

高级氧化法是指在一定的反应条件下通过产生具有强氧化能力的自由基($\cdot\text{OH}$),使大分子有机物降解成低毒或无毒小分子物质的废水处理方法。根据自由基产生方式和反应条件的不同,可将其分为Fenton氧化、臭氧氧化、湿式氧化、光催化氧化、声化学氧化、电化学氧化等。高级氧化法具有反应时间短、反应过程可控、普适性强和氧化降解彻底等优点。武强等^[26]、王春雨等^[27]研究了煤气化废水Fenton试剂-混凝沉淀深度处理工艺,在试验条件下,COD去除率大于70%,色度去除率大于80%。Zhuang等^[28]采用 ZnCl_2 作活化剂,以混合活性炭的污泥(SBAC)为载体,通过浸渍法制成 FeO_x/SBAC 有效催化组分,污染物脱除效果良好。Jia等^[29]研

究了超声与膜生化反应组合的高级氧化工艺,提高了有机物总量的去除率,同时也改善了污染物的降解性能。Zhang等^[30]研究了双极三维反应器(BT-DR)、反应器(UBAF)^[31]处理经A/O法处理过的焦化废水,考察了电解时间、极板间距、电流强度等因素对反应器处理效果的影响,处理后的废水达到GB 13456—1992《钢铁工业水污染物排放标准》中的焦化一级排放标准。

2.3.4 膜分离技术

膜分离技术是利用膜的选择性对不同粒径组分的选择性通过,实现料液选择性分离的技术。根据膜孔径的大小可以分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜等。膜分离过程是物理过程,不伴随有相的变化。田沈等^[32]以陶瓷球为载体,经表面挂膜、增菌处理使微生物细胞附着在陶瓷球表面形成菌膜。处理气化洗焦废水时COD去除率达90.4%,对废水中苯、萘、菲、喹啉、异喹啉和吡啶的去除率也较好。膜处理产生大量的浓盐水是实现废水“零排放”的瓶颈,浓盐水处理技术有常规处理、膜浓缩、高浓盐水蒸发、超高浓度浓盐水喷雾结晶等技术^[33]。

3 煤化工废水处理技术发展方向

煤化工废水中难降解有机物含量高、成分复杂,现有的单一处理工艺较为成熟,但出水均无法满足回用的要求,而多种工艺的联合处理则可以形成互补,在煤化工废水处理过程中达到比较好的效果,因此,开发高效复合处理新工艺将是煤化工废水处理的研究方向之一。高级氧化法具有反应时间短、反应过程可控、水质普适性强、氧化降解彻底等优点,一直是学者的重点研究内容,但目前该技术高成本、高能耗的问题限制了其大规模的应用,开发具有实际应用可行性的高级氧化技术将是废水处理研究的热点之一。膜处理技术具有无相变、无化学反应、选择性好、适应性强、能耗低等优点,在煤化工废水处理中有着广泛的应用前景,新型功能膜材料开发、制备技术优化、分离效果和水通量提高、使用寿命延长等将是未来膜研究工作的主要方向。浓盐水处理是世界性的难题,相关新技术的开发近年来也倍受学者关注。

4 结 语

近些年来,我国煤化工产业发展迅速,产业

示范不断升级,但随之而来是煤化工对生态环境尤其是水资源造成的污染问题也日益严峻。国家对煤化工废水处理、回用的要求也越来越高,煤化工废水达标排放迫在眉睫。国内外学者多年研究结果表明,通过预处理、生化处理和深度处理等多种工艺的组合,煤化工废水完全可以实现达标排放或回收利用。煤化工废水的达标排放或回用,不仅可以实现煤化工废液零排放,破解水资源污染的难题,也是我国煤化工产业健康发展的重要保障。

参考文献(References):

- [1] 任源,韦朝海,吴超飞,等.焦化废水水质组成及其环境学与生物学特性分析[J].环境科学学报,2007,27(7):1094-1100.
Ren Yuan, Wei Zhao hai, Wu Chao fei, *et al.* Environmental and biological characteristics of coking wastewater[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(7): 1094-1100.
- [2] 吴高明.焦化废水(液)物化处理技术研究[D].武汉:华中科技大学,2006:56-58.
- [3] 岳子明,安洪光,滕济林,等.强化混凝对超滤处理碎煤加压气化废水生化出水试验研究[J].水处理技术,2012,38(9):75-78.
Yue Ziming, An Hongguang, Teng Jilin, *et al.* The experimental study on the enhanced coagulation technology for UF treating the waste water in pressurized gasification of pulverized coal after the biological treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, 38(9): 75-78.
- [4] 高会杰,郭志华,张广哲,等.水煤浆气化废水深度处理中试研究[J].石油炼制与化工,2014,45(5):87-90.
Gao Huijie, Guo Zhihua, Zhang Guangzhe, *et al.* Spot test of deep treatment of wastewater from coal-water slurry gasification[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2014, 45(5): 87-90.
- [5] 范树军.煤液化高浓度污水生化处理工程技术研究[J].工程建设,2011,43(3):54-57,45.
Fan Shujun. Study on biochemical treatment technology of high concentration sewerage from coal liquefaction[J]. *Engineering Construction*, 2011, 43(3): 54-57, 45.
- [6] Chen Yun, Wang Zhuo, Li Libo. Liquid-liquid equilibria for ternary systems: methyl butyl ketone + phenol + water and methyl butyl ketone + hydroquinone + water at 298.15 K and 323.15 K[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2014, 59(9): 2750-2755.
- [7] 陈赞,余振江,盖恒军,等.煤气化污水化工处理新流程[J].化工进展,2009,28(12):2253-2256.
Chen Chou, Yu Zhenjiang, Gai Hengjun, *et al.* A novel chemical process for coal-gasification wastewater treatment[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2009, 28(12): 2253-2256.
- [8] Li Chunjie, Tabassum Salma, Zhang Zhenjia. An advanced anaerobic expanded granular sludge bed (AnaEG) for the treatment of coal gasification wastewater[J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2014, 101(4): 57580-57586.
- [9] 孟祥清,马冬云.单塔加压侧线抽提装置在鲁奇加压气化工艺废水处理中的应用[J].工业用水与废水,2010,41(6):73-76.
Meng Xiangqing, Ma Dongyun. The application of single column pressurized side extraction device in Lurgi gasification technology in wastewater treatment[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2010, 41(6): 73-76.
- [10] 王伟.厌氧强化工艺处理煤制气废水中酚类化合物效能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:5-6.
- [11] Kim Young Mo, Park Donghee, Lee Dae Sung, *et al.* Inhibitory effects of toxic compounds on nitrification process for cokes wastewater treatment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(3): 915-921.
- [12] 崔崇威,马放,张艳敏,等.哈依煤氣废水处理改造工艺的技术讨论[J].哈尔滨建筑大学学报,2002,35(5):26-29,106.
Cui Chongwei, Ma Fang, Zhang Yanmin, *et al.* Investigation into the process modification of Hayi coal gasification wastewater treatment plant[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 2002, 35(5): 26-29, 106.
- [13] 滕济林,姜艳,曹效鑫,等.粉末活性炭强化A/A/O工艺处理煤气化废水的中试研究[J].环境科学学报,2014,34(5):1249-1255.
Teng Jilin, Jiang Yan, Cao Xiaoxin, *et al.* Pilot study on powdered lignite-coke-enhanced A/A/O process for coal gasification wastewater treatment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(5): 1249-1255.
- [14] Zhang Chunhui, Hu Haidong, Chen Jun, *et al.* Influential factors on activated sludge deterioration in anoxic-oxic (a/o) biological treatment of coking wastewater[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, 22(6): 1877-1880.
- [15] Ratcliffe Michael, Rogers Cris, Merdinger Mike, *et al.* Treatment of high strength chemical industry wastewater using moving bed biofilm reactor (MBBR) and powdered activated carbon (PAC) technology[J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2006: 1677-1694.
- [16] Li Huiqiang, Han Hongjun, Du Maoan, *et al.* Removal of phenols, thiocyanate and ammonium from coal gasification wastewater using moving bed biofilm reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7): 4667-4673.
- [17] Jia Shengyong, Han Hongjun, Hou Baolin, *et al.* Treatment of coal gasification wastewater by membrane bioreactor hybrid powdered activated carbon (MBR-PAC) system[J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 753-759.
- [18] Zhao Qian, Han Hongjun, Hou Baolin, *et al.* Nitrogen removal from coal gasification wastewater by activated carbon technologies combined with short-cut nitrogen removal process[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(11): 2231-2239.
- [19] 陈莉荣,杨艳,尚少鹏. PACT法处理煤制油低浓度含油废水试验研究[J].水处理技术,2011,37(11):63-65.

- Chen Lirong, Yang Yan, Shang Shaopeng. Study on pact for the treatment of coal-to-liquids wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(11): 63-65.
- [20] Wei Wang, Han Hongjun, Li Huiqiang, *et al.* Treatment of coal chemical wastewater by two-stage anaerobic process[C]// 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010: 1-4.
- [21] Wang Wei, Han Hongjun, Yuan Min, *et al.* Enhanced anaerobic biodegradability of real coal gasification wastewater with methanol addition[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(12): 1868-1874.
- [22] Wang Wei, Ma Wencheng, Han Hongjun, *et al.* Thermophilic anaerobic digestion of Lurgi coal gasification wastewater in a UASB reactor[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2441-2447.
- [23] 袁敏. 两级厌氧工艺预处理煤化工废水的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 25-32.
- [24] 高亚楼, 曲江, 李生敏. 处理造气废水混凝药剂选择的研究[J]. 煤化工, 2010, 38(2): 43-46.
- Gao Yalou, Qu Jiang, Li Shengmin. The choice of coagulant agents on the treatment of coal gasification wastewater[J]. Coal Chemical Industry, 2010, 38(2): 43-46.
- [25] 尹连庆, 张军, 腾济林, 等. 吸附法深度处理煤制气生化废水的研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(11): 104-106.
- Yin Lianqing, Zhang Jun, Teng Jilin, *et al.* Adsorption advanced treatment for coal gas biochemical wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(11): 104-106.
- [26] 武强, 谷启源, 陈凯华, 等. Fenton试剂-混凝沉淀深度处理煤气化废水的实验研究[J]. 煤化工, 2011, 39(6): 45-48.
- Wu Qiang, Gu Qiyuan, Chen Kaihua, *et al.* Experimental study on deep treatment of coal gasification wastewater with fenton reagent coagulation precipitation method[J]. Coal Chemical Industry, 2011, 39(6): 45-48.
- [27] 王春雨, 乔瑞平, 刘峰, 等. 混凝沉淀法和Fenton氧化法组合工艺深度处理煤气化废水的实验研究[J]. 煤化工, 2015, 43(6): 41-44.
- Wang Chunyu, Qiao Ruiping, Liu Feng, *et al.* Experimental study on advanced treatment of coal gasification wastewater by coagulation method coupled with fenton reagent oxidation[J]. Coal Chemical Industry, 2015, 43(6): 41-44.
- [28] Zhuang Haifeng, Han Hongjun, Ma Wencheng, *et al.* Advanced treatment of biologically pretreated coal gasification wastewater by a novel heterogeneous Fenton oxidation process[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 33: 12-20.
- [29] Jia Shengyong, Han Hongjun, Zhuang Haifeng, *et al.* Advanced treatment of biologically pretreated coal gasification wastewater by a novel integration of catalytic ultrasound oxidation and membrane bioreactor[J]. Bioresource Technology, 2015, 189: 426-429.
- [30] Zhang Chunhui, Lin Hui, Chen Jun, *et al.* Advanced treatment of biologically pretreated coking wastewater by a bipolar three-dimensional electrode reactor[J]. Environmental Technology, 2013, 34(16): 2371-2376.
- [31] 张春晖, 何绪文, 王皓, 等. UBAF-复极性三维电极法深度处理焦化废水[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 820-824.
- Zhang Chunhui, He Xuwen, Wang Hao, *et al.* Advanced treatment of coking wastewater by UBAF and bipolar three-dimensional electrode[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 820-824.
- [32] 田沈, 钱城, 刘莹, 等. 生物膜反应器降解生物质气化洗焦废水[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2): 281-285.
- Tian Shen, Qian Cheng, Liu Ying, *et al.* Biodegradation of biomass gasification wastewater with biofilm reactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(2): 281-285.
- [33] 耿翠玉, 乔瑞平, 任同伟, 等. 煤化工浓盐水“零排放”处理技术进展[J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(10): 34-42, 8.
- Geng Cuiyu, Qiao Ruiping, Ren Tongwei, *et al.* "Zero Discharge" processing technology progress of concentrated Brine in coal chemical industry[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2014(10): 34-42, 8.

(上接第120页)

- [10] Torrecilla J, Palomar J, Garcia J, *et al.* Modelling of carbon dioxide solubility in ionic liquids at sub and supercritical conditions by neural networks and mathematical regressions[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2008, 93(2): 149-159.
- [11] Teja A S, Gupta A K, Bullock K, *et al.* Henry's constants of methanol in aqueous systems containing salts[J]. Fluid Phase Equilibria, 2001, 185(1/2): 265-274.
- [12] Chai X S, Falabella J B, Teja A S. A relative headspace method for Henry's constants of volatile organic compounds[J]. Fluid Phase Equilibria, 2005, 231(2): 239-245.
- [13] Alvarez E, Riverol C, Correa J M. Henry's constants of gases and volatile organic compounds in aqueous solutions[J]. Fluid Phase Equilibria, 2006, 241(1/2): 96-102.
- [14] Mani S, Hamid M, Mohsen M. Modeling the hydrogen solubility in methanol, ethanol, 1-propanol and 1-butanol[J]. Fluid Phase Equilibria, 2010, 289(1): 22-39.
- [15] Mani S, Hamid M. Hydrogen solubility in heavy n-alkanes: modeling and prediction by artificial neural network[J]. Fluid Phase Equilibria, 2011, 310(1/2): 150-155.