

高酚氨煤化工废水处理创新技术分析

吴 限^{1,2}, 韩洪军¹, 方 芳¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 环境保护部
环境工程评估中心, 北京 100012)

摘 要: 介绍了煤化工废水高酚、高氨、含大量有毒有害物质的特点及其处理形势与难度,从预处理、生物处理、深度处理三方面综述了当前的创新处理技术,着重分析了酚氨回收、EBA、Bio-Dopp、3T-BAF 和 LAB 等工艺的处理流程及优缺点,并指出了今后的发展方向和企业在选择处理工艺时应注意的问题。

关键词: 煤化工废水; 高酚氨; 预处理; 生物处理; 深度处理

中图分类号: X703 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)04-0026-07

Analysis on Innovative Technology for High Phenol and Ammonia Treatment of Wastewater from Coal Chemical Industry

WU Xian^{1,2}, HAN Hong-jun¹, FANG Fang¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Appraisal Center for Environmental Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China)

Abstract: The characteristics of high phenol, high ammonia and a number of toxic and harmful compounds in wastewater from coal chemical industry as well as its treatment situation and difficulties were introduced. The current innovative treatment technologies were summarized from three aspects including pretreatment, biological treatment and advanced treatment. The treatment process, advantages and disadvantages of phenol and ammonia recovery process, EBA technology, BioDopp process, 3T-BAF process and LAB process were emphatically analyzed. The future development direction and problems that enterprises should pay attention to when selecting processes were pointed out.

Key words: coal chemical industry wastewater; high phenol and ammonia; pretreatment; biological treatment; advanced treatment

煤化工废水主要是指煤气化、煤直接液化和炼焦等工艺过程中产生的废水,其水质成分复杂,主要特征为高酚、高氨,此外还含有大量有毒有害物质,是一种典型的高浓度难生物降解工业废水^[1-3]。目前高酚氨煤化工废水的处理,在平衡处理效果、稳定性以及经济性的情况下基本已达成共识,即采用物

化+生化、厌氧+好氧的处理工艺。其治理技术路线主要由预处理、生物处理和深度处理三部分组成^[4],各研究单位分别在这三部分优化和创新出不同的技术类型。

1 预处理技术

典型的鲁奇煤制气废水中挥发酚含量为 2 900

~3 900 mg/L,非挥发酚含量为 1 600 ~ 3 600 mg/L,氨氮含量为 3 000 ~ 9 000 mg/L^[5]。故预处理多采用物理或化学手段回收废水中高浓度的酚、氨,在资源回用的同时保证后续生物处理工艺的正常稳定运行。高酚氨煤化工废水的预处理技术主要是除油和酚氨回收。

1.1 除油

煤化工废水中的油类物质包括轻质浮油、乳化油以及焦油等,这部分油类物质很难被微生物降解去除,进入生化系统过高的油含量(≥ 30 mg/L)还会影响生化系统的氧转移效率和降解效果,因此必须在预处理阶段加以去除。

当前广泛采用的油类去除工艺是气浮,为了尽量避免各方法的局限性,发挥各处理单元的优势,常利用几种方法联合分级使用来保证除油效率。大唐克旗煤制气废水的预处理环节采用尼克尼+溶气气浮相结合的两级浮选工艺,保证了出水油含量 < 20 mg/L。

传统气浮工艺普遍采用空气作为气源。由哈尔滨工业大学创新研发的氮气气浮除油工艺(国家专利技术),采用惰性气体(氮气)作为气源,避免了因空气预氧化导致的废水色度加深、泡沫增加以及预氧化中间产物苯醌类物质难以生化降解的问题,为后续生化处理创造了良好的条件^[6]。氮气气浮作为 EBA 工艺的预处理技术,已成功应用于中煤鄂尔多斯能源化工有限公司废水处理工程,有效保障了后续生化处理工艺的的稳定运行。

1.2 酚氨回收

酚氨回收处理是将废水中 CO_2 、 H_2S 等酸性气体,游离氨和固定氨,酚类及其他三类有机污染物等进行回收及脱除,使废水达到后续生化处理的要求,是高酚氨煤化工有机废水处理的关键环节^[7]。酚氨回收工艺技术的差异主要表现在脱氨脱酚的先后顺序,以及脱酚萃取剂的选择上。

1.2.1 鲁奇工艺技术

针对气化炉产生的高浓酚氨废水,鲁奇公司提出先酸化,再萃取脱酚、脱酸,后脱氨及溶剂回收的处理流程(见图 1)。Phenosolvan 酚回收和 CLL 氨回收均为鲁奇专有技术。Phenosolvan 酚回收工艺采用五级混合—澄清槽连续逆流萃取工艺,萃取剂为二异丙基醚(DIPE)。经酚回收单元处理后,废水中悬浮固体和烃含量 < 50 $\mu\text{g/g}$,单酚含量 < 20 $\mu\text{g/g}$

g,多元酚萃取率达 85%,总酚去除率 $> 99\%$ ^[8];CLL 氨回收通过 NH_3 和酸性气体(CO_2 、 H_2S)的共沸精馏,分别回收氨及含硫酸气,同时回收 DIPE。经氨回收处理后,废水中的游离氨含量 < 50 $\mu\text{g/g}$,COD 含量 $< 3 000$ mg/L,进入后续生物处理单元。

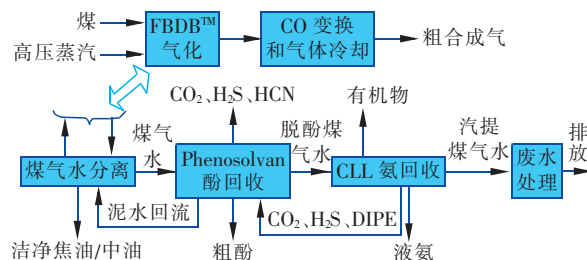


图 1 鲁奇酚氨回收工艺流程

Fig. 1 Flow chart of Lurgi ammonia recovery process

鲁奇酚氨回收工艺在南非 Sasol、美国北达科他州大平原煤制气项目的应用中,处理后均能达到当地的排放标准。其中南非 Sasol 的出水总酚和氨浓度分别低于 130 及 100 mg/L。鲁奇酚氨回收工艺在国外的应用中拥有良好的处理效果,但其能否适应我国特定煤质的高酚氨气化废水,还有待后续的跟进报道与研究。

1.2.2 华南理工/青岛科技大学技术

华南理工大学与青岛科技大学开发的工艺是在原有脱酸、再萃取脱酚、后脱氨基础上,将脱氨提至萃取脱酚前。两者区别在于:青岛科技大学酚氨回收工艺中脱酸、脱氨在两个塔分别进行,采用二异丙基醚(DIPE)作萃取剂。华南理工大学酚氨回收工艺中,脱酸、脱氨在同一个塔(前置)进行,使用甲基异丁基酮(MIBK)作为萃取剂,其工艺流程见图 2。

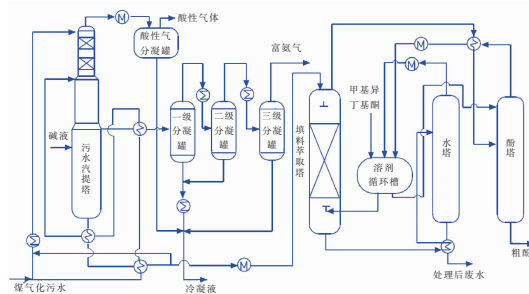


图 2 华南理工大学酚氨回收工艺流程

Fig. 2 Flow chart of phenol ammonia recovery process in South China University of Technology

高酚氨煤化工废水分冷、热两股,一股经冷却后进入废水汽提塔塔顶的填料段上部;另一股经侧

线抽出气换热后,进入废水汽提塔填料段下第一层塔盘。汽提出的氨气、二氧化碳和硫化氢经冷凝分相后从塔顶排出;从单塔侧线采出的混合气经三级分凝后,得到高浓度氨气,冷凝液回原料罐。废水汽提塔底出水经冷却后,送入萃取塔上部进行逆流萃取,萃取相经泵送入酚塔进行溶剂回收,精馏分离粗酚和甲基异丁基酮,甲基异丁基酮回用;萃取余相送至溶剂汽提塔(水塔),从顶部蒸馏出甲基异丁基酮

回用,塔底出水送后续生化处理^[9]。

将脱氨前提至萃取前,可以为萃取脱酚营造优良的 pH 环境;单塔脱酸脱氨更节能;同时采用甲基异丁基酮(MIBK)作为萃取剂,对多元酚回收效果更好。先脱氨再脱酚已在哈尔滨气化厂、内蒙古大唐国际克什克腾煤制气、中煤鄂尔多斯能化等多处工程应用。该工艺的工程应用情况及与鲁奇工艺的对比见表 1。

表 1 不同酚氨回收工艺工程应用情况

Tab. 1 Applications of different phenol ammonia recovery processes

项 目		鲁奇工艺技术	青岛科技大学技术	华南理工大学技术	
技术特点	分离序列	酸化-萃取脱酚-脱酸-脱氨-溶剂回收	脱酸-脱氨-萃取脱酚-溶剂回收	脱酸脱氨-萃取脱酚-溶剂回收	
	萃取剂	二异丙基醚(DIPE)	二异丙基醚(DIPE)	甲基异丁基酮(MIBK)	
	萃取设备	多级逆流特殊设计的萃取罐	填料萃取塔	填料萃取塔	
工程实例		南非 Sasol 工厂	内蒙古大唐国际克什克腾煤制气	哈尔滨气化厂	中煤鄂尔多斯能化
废水处理量/(m ³ ·h ⁻¹)		800×2	300×2	130	92
进水/(mg·L ⁻¹)		总酚:3 500 氨:15 000 CO ₂ :22 000	总酚:5 950 氨:6 400 CO ₂ :705 COD:24 200	总酚:5 140 氨:8 500 CO ₂ :4 500 COD:25 000	总酚:4 472 氨:16 630 CO ₂ :18 000 COD:19 072
出水/(mg·L ⁻¹)		总酚:130 氨:100 CO ₂ :<50 COD:1 600	总酚:550 氨:148 CO ₂ :未测 COD:3 400	总酚:<250 氨:<150 CO ₂ :痕量 COD:<2 000	总酚:535~629 氨:120~310 CO ₂ :未测 COD:2 842~3 305

2 生物处理技术

生物处理是高酚氨煤化工废水处理的主体工艺。从表 1 的出水指标可以看出,预处理出水 COD 含量很高(2 000 mg/L 以上),总酚为 250~600 mg/L 或更高,氨氮也在 100~200 mg/L 之间,另外还可能含有氰化物等生物抑制组分。实践表明,单纯的好氧或者厌氧很难取得预期的处理效果,故高酚氨煤化工废水的生物处理技术普遍采用好氧与厌氧联用的方式。

2.1 EBA 工艺

EBA 工艺是由哈尔滨工业大学根据多年的研究成果,整合多项国家专利技术研发的专门处理鲁奇炉、BGL 炉以及低温裂解炉等产生的高浓度酚氨废水的组合处理技术,在国内首次实现了煤化工废水的达标排放。2012 年获国际水协会(IWA)项目(东亚和亚太地区)工程创新奖。该生物组合技术包括预处理、EC 外循环厌氧、BE 生物增浓、多级 A/O 以及后续高密度沉淀技术、高级氧化技术以及 BAF 等深度处理技术。

其处理工艺流程见图 3。

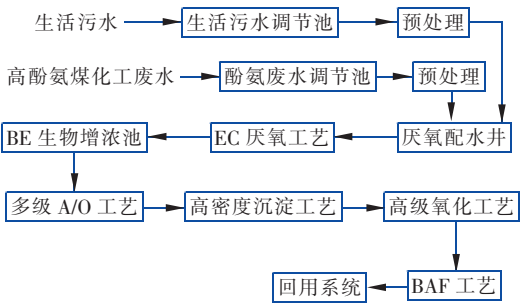


图 3 EBA 工艺处理流程

Fig. 3 Flow chart of EBA biological combined process

前已述及,预处理采用氮气气浮除油可避免预氧化,保证生化处理良好运行。

EC 外循环厌氧技术在改善高浓度酚氨废水水质的同时,实现部分有机物的羧化和苯酰化,避免多元酚向苯醌类物质的转化,降低后续好氧生物处理难度。

BE 生物增浓技术充分发挥生物膜和活性污泥联合工作的优势,通过控制特定的水力条件、高生物添加剂、高污泥浓度、高污泥龄等参数,在低溶解氧状态下,有效降低酚类物质毒性、实现有机物去除和

短程硝化反硝化脱氮。

多级 A/O 脱氮技术为分点进水三级 A/O 工艺,可以针对酚氨回收废水中剩余氨氮和有机物的降解需要灵活调整回流比。针对 BE 生物增浓处理出水中剩余有机物和氨氮的 C : N 比不足的问题,多级 A/O 通过多级缺氧与好氧条件的交替运行,强化硝化和反硝化脱氮以及有机物降解^[10]。

多级 A/O 出水中仍含有部分难降解的 COD 和悬浮物等,将通过深度处理进一步去除。

EBA 工艺具有有机负荷高、组合性强、水力停留时间短、占地面积小、基建投资省、能耗及运行成本低的优点。该工艺已在中煤龙化哈尔滨煤化工公司煤制气废水处理中成功运行 6 年,COD 去除率 > 98%,处理后废水达标排放。另外,中煤鄂尔多斯能源化工有限公司废水处理工程经过 15 个月(2013 年 12 月—2015 年 3 月)的稳定运行,生化处理系统的出水 100% 回用至原水系统,蒸发结晶工艺每天生产 12 ~ 20 t 结晶盐,实现了真正意义上的零排放。EBA 组合工艺包含从预处理到生化处理,再到深度处理(后述)的完整流程。

2.2 BioDopp 工艺

BioDopp 是德国 Engelbart 博士及其团队研究并开发的一体化生化处理工艺,并授权北京博汇特环保公司在国内推广应用。BioDopp 工艺结合氧化沟的全液内回流及一体化结构理念,利用 A²/O 的不同功能分区形式,借助 CASS 工艺前置选择区模式,辅以高效的曝气技术,通过创新的空气提推技术作为源动力,将不同功能单元有机结合在一起^[11]。BioDopp 的工艺结构见图 4。

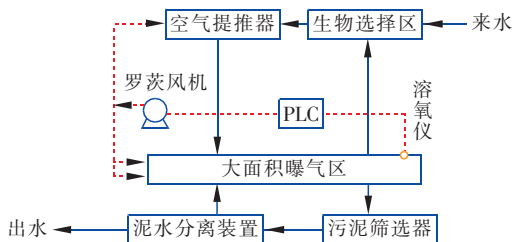


图 4 BioDopp 工艺结构示意图

Fig. 4 Sketch map of BioDopp process

BioDopp 的技术特色包括 BioDopp MAT、空气提推、高回流比、高速澄清器、微生物驯化、SAS 系统。BioDopp MAT 曝气是一种低通气量的微孔曝气技术,氧转移效率高的同时杜绝了曝气盲区,且检修

无需停车。其好氧池末端溶解氧浓度仅控制在 0.15 ~ 0.30 mg/L,在此状态下实现全流程的短程同步硝化反硝化。空气提推(Airlift Device)是依靠厌氧气体或者鼓风机产生的压缩空气作为动力源,在特殊的池体结构下提高充气区液面来推动水体的运动。BioDopp 中的空气提推采用低扬程大断面的方式实现大水量的流动,扬程一般为 50 mm。废水的高回流比通过空气提推技术实现,系统瞬间稀释进水浓度,为微生物创造相对稳定生存环境的同时也能有效抵抗负荷冲击^[12]。相比于传统工艺 1 ~ 3 倍的回流比,BioDopp 在较低的能耗下可实现几十至几百倍的回流。高速澄清器借助设计独特的澄清漏斗和专属填料布置方式,完成高效快速澄清,并且省去了污泥回流泵房。微生物驯化是 BioDopp 的关键技术,其污泥龄是传统工艺的 2 倍以上,污泥浓度是传统工艺的 2 ~ 3 倍。SAS 智能抗冲击系统无需人工控制,能自动化解来水负荷冲击。

BioDopp 工艺占地少、能耗低、投资少及运营管理简便,且对高酚含量的耐受性较好^[13]。刘利军^[14]的中试结果表明 BioDopp 生化工艺处理鲁奇气化炉废水,COD、氨氮、总酚和总油的平均去除率分别为 98.45%、99.30%、99.90%、99.32%。目前已应用在中石化石家庄化纤厂污水处理工程、河南煤化工义马气化厂煤气化污水改造工程等。BioDopp 工艺在河南煤化集团义马气化厂^[15]的处理结果见表 2。

表 2 义马气化厂 BioDopp 工艺去除效果分析

Tab. 2 Removal effect of BioDopp process in Yima gasification plant

项 目	进水/ (mg · L ⁻¹)	出水/ (mg · L ⁻¹)	平均去除率/ %
COD	5 230	77.52	98.5
NH ₃ - N	216.24	1.16	99.5
总氮	378.02	98.6	73.9
总酚	1 193.6	1.21	99.9
总油	196.5	1.19	99.4

2.3 3T - BAF 工艺

3T - BAF 工艺全称为曝气生物流化床非常规生化工艺,其核心工艺为三级生物滤池。生物滤池的流化介质采用持水量大、空隙率为 96%、比表面为 3.5 × 10⁶ m²/m³ 的专用载体,池中生物量可达 8 ~ 40 g/L,并以此来获得更快的降解速度^[16]。3T - BAF 处理工艺流程见图 5^[17]。

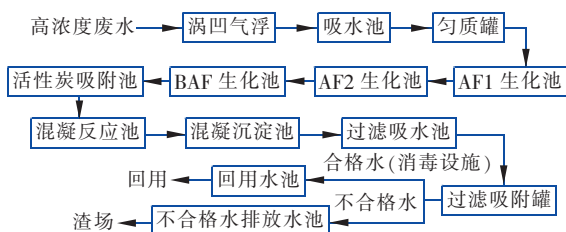


图 5 3T-BAF 处理工艺流程

Fig. 5 Sketch map of 3T-BAF process

AF1 为厌氧生物滤池,主要进行水解酸化,提升废水可生化性。AF2 为兼氧生物滤池,主要通过异

养菌属去除 COD 及酚类物质。作为厌氧和好氧的过渡段,可通过调节兼氧池的曝气量来适应水量、水质的变化。BAF 好氧生物滤池主要去除有机物和氨氮。3T-BAF 作为“近零排放”工艺整体解决方案中的一环,在运行中无不良气味,不产生任何形式的二次污染。但存在进水水质(特别是酚含量)、水量波动时,出水水质不能稳定达标的问题,仍需不断调试优化。3T-BAF 作为高浓度有机废水处理系统,已应用于内蒙古鄂尔多斯神华煤制油废水处理工程,处理效果见表 3^[17]。

表 3 3T-BAF 处理效果

Tab. 3 Treatment effect of 3T-BAF process

项目	系统进水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	AF1 出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	AF2 出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BAF 出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	系统出水/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总去除率/%
S^{2-}	50	3	2	<0.5	≤ 0.1	≥ 99.8
氨氮	100	100	90	<3	≤ 3	≥ 97
油	100	5.5	2.8	<1.5	≤ 0.5	≥ 99.5
挥发酚	50	30	10	<0.5	≤ 0.1	≥ 99.8
COD	10 000	4 000	1 950	<98	≤ 49	≥ 99.51

3 深度处理技术

煤化工废水经预处理、生化处理后各类污染物得到大幅度的降解,但是剩余的难降解有机物使得出水的 COD(200 ~ 500 mg/L 左右)和色度等指标仍难以达到排放标准^[18],因此在生化处理工段之后设置深度处理工艺。

目前,煤化工废水深度处理技术有混凝沉淀、过滤法、吸附法、高级氧化法及膜处理等,实际工程中的深度处理往往不局限于某一种工艺,而是多种工

艺的有机组合。

3.1 高密度沉淀 + 高级氧化 + BAF

EBA 工艺的深度处理部分采用高密度沉淀 + 高级氧化 + BAF 的处理流程,其中煤鄂尔多斯能源化工有限公司废水处理工程的应用中,COD、氨氮、挥发酚和总酚的去除率分别达到 98%、99%、100% 和 98%,出水水质满足《循环冷却水用再生水水质标准》(HG/T 3923—2007)。具体水质控制指标见表 4,工艺流程参见图 3。

表 4 中煤鄂尔多斯能源化工有限公司废水处理工程出水指标

Tab. 4 Effluent quality of wastewater treatment project in Erdos Energy Chemical Co. Ltd.

项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硫化物/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	油类/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷(以 PO_4^{3-} 计)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	细菌总数/ (个 $\cdot \text{mL}^{-1}$)
数值	≤ 60	≤ 5	≤ 15	≤ 0.1	≤ 0.5	≤ 5	$\leq 1 \times 10^4$

高密度沉淀技术主要是通过活性硅藻土的物理化学吸附功能,进一步吸附去除多级 A/O 出水中难降解的 COD,同时活性硅藻土和污水中的悬浮物等一起沉淀。部分在沉淀污泥中的活性硅藻土以絮体形式一起回流到吸附段的首段继续反应,剩余活性硅藻土随沉淀污泥排至污泥脱水间进行处理。

高级氧化技术采用非均相臭氧氧化技术,是以产生 $\cdot \text{OH}$ 等强活性自由基为目的的高级氧化过程。邢林林等^[19]采用非均相催化臭氧氧化技术对焦化废水进行中试,结果表明:废水进水 COD 为

120 ~ 150 mg/L ,在臭氧氧化作用下出水 COD 可以稳定在 80 mg/L 。

BAF 技术采用亲水性滤料,拥有吸附、截滤和生物降解的功能,对废水中剩余有机物和氨氮等进行进一步处理。

3.2 LAB 工艺

LAB 工艺是指活性焦吸附/生化联合工艺,其研发获国家“863”计划支持,并应用于国家煤制气示范项目——大唐国际克旗煤制气废水处理工程。

大唐克旗煤制天然气项目废水处理系统前部分

为同方环境的常规 A/O 工艺, COD 由进水的 3 500 mg/L 处理到 350 mg/L。深度处理系统采用大唐公司自有的 LAB“活性焦吸附工艺”, 其流程为活性焦吸附 + BAF + 滤池。大唐克旗煤制天然气项目废水处理系统总流程见图 6。

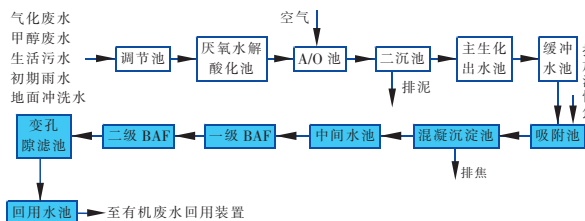


图 6 大唐克旗煤制天然气项目废水处理系统流程

Fig. 6 Sketch map of Datang Keshi coal-to-gas project wastewater treatment

LAB 工艺深度处理先用活性焦吸附去除水中难降解物质, 并通过两级 BAF 来保证出水 COD < 50 mg/L。将活性焦吸附置于常规生化之后, 可利用活性焦吸附“调节简单灵活、处理范围宽”的优点, 防止生化波动而导致出水不稳定, 还可以明显降低废水中的有机物浓度, 缓解膜污染并提高产水水质^[20]。二级 BAF 出水经变孔隙滤池过滤, 再经反渗透及振动膜处理后进入蒸发结晶单元。LAB 工艺处理效果见表 5。

表 5 LAB 工艺处理效果

Tab. 5 Treatment effect of LAB process

项 目	pH 值	COD/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	总酚/ (mg · L ⁻¹)
进水	10. 1	3 500	< 150	700
出水	8. 16	< 50	33	25. 3 (A/O 出水)

3.3 芬顿氧化—混凝沉淀

芬顿氧化是通过 H₂O₂/Fe²⁺ 诱导产生 ·OH 进行化学氧化的废水处理方法, 也是较为常用的一种高级氧化技术。芬顿氧化具有反应速率高, 操作方便, 可产生絮凝、吸附性能等优点。李志远^[21] 针对煤化工废水生化出水进行芬顿氧化试验, 结果表明, 芬顿氧化后在去除 COD 的同时, 出水色度、挥发酚等指标有较大程度的升高, 因而推断芬顿氧化不适宜单独处理煤化工废水生化出水。芬顿氧化联合混凝沉淀法克服了上述不足, 在出水 COD 和色度均达标的基础上, 芬顿氧化—混凝法挥发酚去除率可达 80%, 优于单一混凝沉淀法。芬顿氧化—混凝法对于中煤龙化哈尔滨公司生化厌氧出水的试验结

果^[22] 见表 6。

表 6 芬顿氧化—混凝处理煤化工废水生化出水试验结果

Tab. 6 Experimental results of Fenton oxidation and coagulation treating biochemical effluent of coal chemical wastewater

项 目	进水	出水
COD/(mg · L ⁻¹)	140	40 (71. 74%)
色度/倍	160	16 (89. 87%)
氨氮/(mg · L ⁻¹)	30	28 (8. 16%)
挥发酚/(mg · L ⁻¹)	7. 2	1. 5 (79. 55%)

注: 括号内数值为去除率。

芬顿氧化—混凝沉淀法的不方便之处在于反应 pH 值须控制在酸性条件, 并且对氨氮的去除效果不佳, 还存在较大的改进空间。

4 结语

高酚氨煤化工废水处理难度大, 处理工艺普遍存在系统稳定性差、出水水质不达标等现象。“零排放”的要求, 则对处理工艺提出了更高的要求和挑战。利用厌氧 + 好氧组合工艺, 并与后续“零排放”有机结合是未来煤化工废水处理工艺的必然发展方向。所以, 高酚氨煤化工废水处理技术的选择要全面看待, 注重组合优势, 并着重考虑以下问题。

① 预处理是保障生化处理效能的关键, 特别是酚氨回收环节, 应根据具体工程水质情况选择合适的萃取剂及工艺流程, 并评估预处理对生化处理的影响。

② 生物处理环节主要关注工艺对于酚类和氨氮的去除, 以及抗冲击负荷的能力。

③ 深度处理不仅要注重出水指标, 还要综合考虑处理成本选择相应工艺。

④ 选择处理工艺时, 应在已有中试结果的基础上, 重点调研相似工程实际应用的效果, 并考虑处理后接“零排放”工艺的可行性、经济可行性及运行稳定性。

参考文献:

- [1] Busca G, Berardinelli S, Resini C, et al. Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments [J]. J Hazard Mater, 2008, 160 (2/3): 265 - 288.
- [2] Li H Q, Han H J, Du M A, et al. Removal of phenols, thiocyanate and ammonium from coal gasification wastewater using moving bed biofilm reactor [J]. Biore-sour Technol, 2011, 102 (7): 4667 - 4673.

- [3] Li H Q, Han H J, Du M A, *et al.* Inhibition and recovery of nitrification in treating real coal gasification wastewater with moving bed biofilm reactor [J]. J Environ Sci, 2011, 23(4): 568 - 574.
- [4] 蒋芹, 郑彭生, 张显景, 等. 煤气化废水处理技术现状及发展趋势[J]. 能源环境保护, 2014, 28(5): 9 - 12.
- [5] Gai H J, Jiang Y B, Qian Y, *et al.* Conceptual design and retrofitting of the coal-gasification wastewater treatment process [J]. Chem Eng J, 2008, 138(1/3): 84 - 94.
- [6] 李丹阳. 基于氮气气浮除油与改善煤化工废水生化处理效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 纪钦洪, 于广欣, 张振家. 高浓含酚煤气化有机污水处理研究进展[J]. 水处理技术, 2015, 41(3): 6 - 10.
- [8] 付国忠, 朱继承. 鲁奇 FBDB 煤气化技术及其最新进展[J]. 中外能源, 2012, 17(1): 74 - 79.
- [9] 陈赞, 王卓. 煤气化污水酚氨回收技术进展、流程优化及应用[J]. 煤化工, 2013, (4): 44 - 48.
- [10] 韩洪军, 徐鹏, 贾胜勇, 等. 厌氧/生物增浓/改良 AO/BAF 工艺处理煤化工废水[J]. 中国给水排水, 2013, 29(16): 65 - 67.
- [11] 赵婧, 孙体昌, 李雪梅, 等. 煤气化废水处理工艺的现状与发展方向[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(4): 1 - 6.
- [12] 郭二民, 张雷, 任晓杰, 等. BioDopp 工艺处理 Lurgi 气化污水的研究及应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2015, (4): 49 - 52.
- [13] Santos V L, Linardi V R. Biodegradation of phenol by a filamentous fungi isolated from industrial effluents - identification and degradation potential [J]. Proc Biochem, 2004, 39(8): 1001 - 1006.
- [14] 刘利军. 鲁奇气化炉废水生化处理的中试实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [15] 李雪平, 蔡少华, 苗建林. BioDopp 工艺在鲁奇气化炉废水处理上的应用研究[J]. 河南化工, 2012, 29(21): 46 - 49.
- [16] 魏江波. 煤制油废水零排放实践与探索[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(5): 70 - 75.
- [17] 郝志明, 郑伟, 余关龙. 煤制油高浓度废水处理工程设计[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(3): 76 - 79.
- [18] 王伟, 韩洪军, 张静, 等. 煤制气废水处理技术研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(3): 681 - 686.
- [19] 邢林林, 曹宏斌, 李玉平. 非均相催化臭氧氧化深度处理焦化废水的中试研究[A]. 中国环境科学学会 2010 年学术年会论文集[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [20] 徐莉莉, 孙硕, 王军, 等. 活性焦吸附对煤化工废水膜处理工艺的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10): 3827 - 3832.
- [21] 李志远. 芬顿氧化混凝沉淀处理煤化工废水生化出水试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [22] 李志远, 韩洪军. 芬顿氧化—混凝处理煤化工废水生化出水试验研究[J]. 给水排水, 2013, 39(S1): 316 - 319.



作者简介: 吴限(1992 -), 男, 安徽安庆人, 哈尔滨工业大学与环保部评估中心联合培养研究生, 研究方向为煤化工废水处理现状与技术改进。

E-mail: endlesswx@126.com

收稿日期: 2016 - 07 - 23