

# 煤制天然气废水处理技术研究现状及展望

顾 强

(伊犁新天煤化工有限责任公司, 新疆 伊犁 835000)

**摘要:**为实现煤制天然气项目的“废水零排放”, 论述了煤制天然气“废水零排放”主要工艺, 如酚氨回收、有机废水处理、含盐废水处理、浓盐水处理、高浓盐水处理、结晶盐处理等, 并分析了各工序处理技术的特点及存在问题, 并对煤制天然气及煤化工废水零排放处理发展趋势进行展望。未来应通过生产系统与水系统的优化, 研究废水处理与利用的新途径, 实现废水减量化; 提高酚氨回收过程的回收效率及装置稳定性, 降低运行成本; 开发抗毒生化技术; 研发高性能、抗污染膜材料, 形成新工艺; 开发经济、可靠的浓盐水脱除 COD 技术; 开发高回收率、高纯度的分盐结晶工艺; 形成煤化工废水结晶盐产品标准, 促进废水结晶盐资源化利用。

**关键词:**煤制天然气; 废水处理; 酚氨回收; 高盐水; 膜浓缩

**中图分类号:** X78      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-6772(2017)05-0092-06

## Research status and prospect of wastewater treatment from coal to methane process

GU Qiang

(Yili Xintian Coal Chemical Co., Ltd., Yili 835000, China)

**Abstract:** In order to realize the zero discharge of wastewater from coal to methane project, the primary wastewater treatment processes, such as phenol ammonia recovery, organic wastewater treatment, salt containing wastewater treatment, concentrated brine treatment, high concentration brine treatment, crystal salt treatment, and their characteristics were systematically summarized and analyzed. Finally, the development trend of zero discharge treatment technology was overviewed. In the future, the producing system and water supply system should be combined to optimize the process and to develop new approach for wastewater treatment and utilization. Such process can reduce wastewater and improve the recovery efficiency and stability of phenol ammonia recovery process, and even cut down operating costs. The anti-virus biochemical technology, high-performance anti-pollution film materials, high recovery rate and high purity salt crystallization process should be developed. The standard for coal chemical wastewater crystallization salt product should be formulated.

**Key words:** coal to methane; wastewater treatment; phenol ammonia recovery; high salt waste water; membrane enrichment

## 0 引 言

针对我国“富煤、少气、缺油”的资源特点, 煤制天然气是缓解我国天然气需求压力的有效途径。基于粗煤气甲烷含量高、投资费用低、国产化程度高等优势, 鲁奇炉煤制气工艺在煤制天然气领域占有重要地位。但鲁奇气化会产生  $0.8 \sim 1.0 \text{ m}^3$  废水(以每吨煤计)<sup>[1]</sup>, 废水组分极其复杂, 含有大量酚类、

长链烷烃、吡啶等有毒难降解有机物, 还有氨氮、硫化物、氰化物等有毒无机物, 属于高浓度难降解工业废水, 其中酚类物质是废水中化学需氧量(COD)的主要来源<sup>[2]</sup>。煤制天然气项目目前大多布局在煤炭资源丰富新疆、内蒙古等地, 而这些地区水资源匮乏, 一般无纳污水体, 要求做到“废水零排放”。煤制天然气项目“废水零排放”关键在于高浓度含酚氨废水的处理、废水回用及浓盐水 COD 脱除、结

收稿日期: 2017-04-20; 责任编辑: 白娅娜      DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.018

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050501)

作者简介: 顾 强(1964—), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 从事煤炭清洁转化及废水处理工作。E-mail: 492841270@qq.com

引用格式: 顾强. 煤制天然气废水处理技术研究现状及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(5): 92-97.

GU Qiang. Research status and prospect of wastewater treatment from coal to methane process[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 92-97.

晶盐的安全处置。酚氨回收目前国际上最成熟是南非萨索尔公司 Phenosolvan 工艺,出水总酚稳定在 120 mg/L 以内,为后续废水处理奠定了良好基础。煤炭科学技术研究院有限公司针对煤化工含酚废水提出了新型高效络合萃取脱酚技术,并开发了专有萃取剂,出水总酚可控制在 300 mg/L 以内,较国内传统技术出水 1 000 mg/L 有较大进步<sup>[3-6]</sup>。针对废水回用过程中浓盐水 COD 难以脱除的问题,段锋等<sup>[7]</sup>提出了“混凝+活性炭吸附”联用工艺处理煤化工高含盐废水的工艺,可有效去除煤化工高含盐废水 COD。针对结晶杂盐的处置,权秋红等<sup>[8]</sup>、陈业钢等<sup>[9]</sup>分别提出了分盐结晶工艺,通过蒸发结晶工艺将高浓盐水结晶分离出纯净的 NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,对结晶盐进行资源化处理。笔者对煤制天然气废水处理各工序技术特点及存在问题进行分析,对煤制天然气及煤化工废水零排放处理发展趋势进行总结与展望,以期促进煤制天然气项目的“废水零排放”的实现。

### 1 “废水零排放”基本思路

煤制天然气项目实现“废水零排放”,即对生产过程中所有的生产废水、污水、清净下水等经过处理后的水全部回用,不对外排放废水。工艺流程由酚氨回收、有机废水处理、含盐废水处理、浓盐水处理、高浓盐水处理 5 个环节组成,基本思路如图 1 所示。

来自煤气化工序的气化废水经除油和酚氨回收

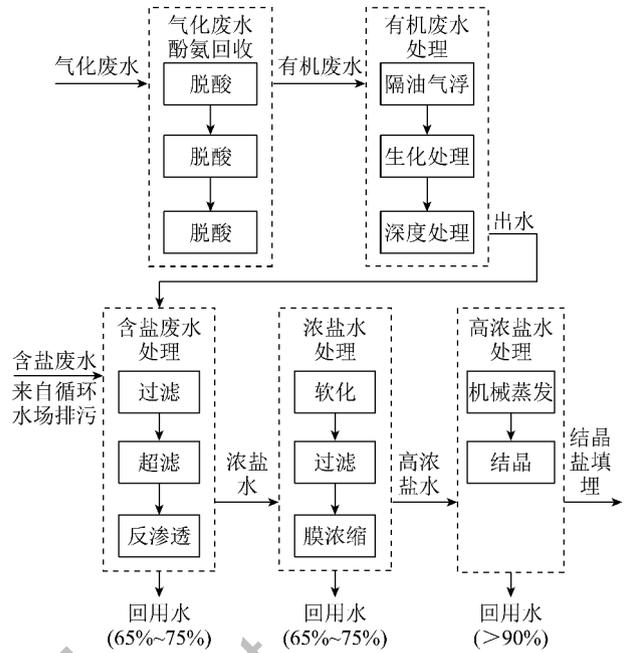


图 1 煤制天然气废水处理零排放基本思路

Fig. 1 Basic idea of zero discharge of wastewater treatment from coal to methane

单元回收大部分焦油、酚类物质、氨后进入有机废水处理单元,经以生化处理为主体的工艺去除大部分 COD 和氨氮,出水进入含盐废水处理单元。而来自脱盐水和循环水站的废水也进入含盐废水处理单元,经超滤、反渗透膜处理回用 70% 以上的水,剩余浓盐水进一步膜浓缩成高浓盐水,再经蒸发结晶单元形成固态结晶盐,送往危险废弃物填埋厂填埋。表 1 是每一段废水处理工艺进水和出水水质情况。

表 1 煤制天然气废水处理工艺进水和出水水质设计值

Table 1 Design value of influent and effluent water quality of wastewater treatment from coal to methane process

工艺	进水水质	出水水质	指标
酚氨回收	COD 质量浓度 9 000 ~ 20 000 mg/L 总酚质量浓度 > 5 000 mg/L 氨氮质量浓度 > 3 000 mg/L 油质量浓度 > 300 mg/L	COD 质量浓度 3 000 ~ 4 000 mg/L 总酚质量浓度 300 ~ 500 mg/L 氨氮质量浓度 150 ~ 300 mg/L 油质量浓度 100 ~ 200 mg/L	总酚去除率 > 90% 氨氮去除率 > 90%
有机废水生化处理	同酚氨回收工艺出水水质	COD 质量浓度 50 ~ 80 mg/L 氨氮质量浓度 < 15 mg/L 油质量浓度 < 5 mg/L	COD 和氨氮去除率大于 90%
含盐废水回用	COD 质量浓度 50 ~ 80 mg/L 总溶解固体 TDS 质量浓度 2 500 ~ 3 500 mg/L	回用水水质: COD 质量浓度 < 30 mg/L 氨氮质量浓度 < 5 mg/L TDS 质量浓度 < 1 000 mg/L 浓盐水出水水质: TDS 质量浓度约为 10 000 mg/L	除盐率 95% 以上, 水回收率 65% ~ 75%
浓盐水处理	TDS 质量浓度约为 10 000 mg/L	TDS 质量浓度 > 50 000 mg/L	—
高浓盐水处理	TDS 质量浓度 > 50 000 mg/L	TDS 质量浓度 > 100 000 mg/L	—

## 2 酚氨回收处理

酚氨回收处理是将废水中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等酸性气体、游离氨和固定氨、酚类及其他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,保证酚氨回收单元的处理效果,是实现废水达标处理的

前提和关键。

酚氨回收处理代表工艺有脱酸—萃取脱酚—脱氨工艺、脱酸—脱氨—萃取脱酚工艺、单塔加压侧线抽提(酸性气体、氨同塔脱除)—萃取脱酚工艺和南非萨索尔公司 Phenosolvan 工艺。不同酚氨回收工艺对比见表 2<sup>[10]</sup>。

表 2 不同酚氨回收工艺的对比<sup>[10]</sup>

Table 2 Comparison of different phenol ammonia recovery processes<sup>[10]</sup>

工艺	技术来源	技术特征	应用厂家
Sasol 的 Phenosolvan 工艺	南非萨索尔公司自有技术	萃取剂:二异丙基醚 pH:9 萃取温度:40 °C 主要设备:五级萃取槽、溶剂汽提塔、酚塔	南非萨索尔公司
脱酸—萃取脱酚—脱氨工艺	引进原民主德国	萃取剂:二异丙基醚 pH:9.0~10.5 剂水比:1:5.6 萃取温度:40 °C 主要设备:萃取塔、酚塔、水塔	哈尔滨气化厂(改造前)、 义马气化厂酚氨回收一期
单塔加压侧线抽提脱酸脱氨—脱酚工艺 <sup>[11]</sup>	华南理工大学与 青岛科技大学联合开发	萃取剂:甲基异丁基酮 pH:6~7.5 剂水比:1:5.5 萃取温度:40~60 °C 主要设备:萃取塔、酚塔、水塔	哈尔滨气化厂、 中煤图克化肥厂
脱酸—脱氨—萃取脱酚工艺		萃取剂:甲基异丁基酮 pH:7~8 剂水比:1:5.5~1:6 萃取温度:40~60 °C 主要设备:萃取塔、酚塔、水塔	伊犁新天、河南义马气化厂、 大唐克旗、义马气化厂二期等

目前酚氨回收存在出水总酚和 COD 偏高、指标波动严重、前处理效果差、油及悬浮物含量高、换热器易堵塞等问题,造成频繁停车清洗。目前传统的先脱除酸性气体后脱酚工艺,出水酚质量浓度可达 1 000 mg/L 左右<sup>[12]</sup>,先脱酸脱氨后脱酚工艺出水酚质量浓度可降至 400~600 mg/L,基本是多元酚,主要是由于萃取剂对多元酚分配系数不高导致的。煤炭科学技术研究院有限公司针对煤化工含酚废水多元酚难萃取的问题,对煤制气废水脱酚络合萃取剂和稀释剂筛选、络合萃取平衡、络合萃取机理、络合萃取动力学等展开了大量研究,开发了高效络合萃取剂,经过连续小试试验,出水总酚可控制在 300 mg/L 以内。

COD,含量为 3 500 mg/L;② 高氨氮,250 mg/L 左右;③ 有机污染物复杂,含有苯类烃、萘、多元酚、吡啶、噻吩等;④ 毒性大,含有酚、氰化物、硫化物等有毒有害物质;⑤ 可生化性低, $\text{BOD}_5/\text{COD}$ (5 日生化需氧量与化学需氧量的比值,是污水可生化降解性的指标)在 0.3 以下。

有机废水生化处理是“废水零排放”的基础,如果处理后残留有机物浓度过高,极易污染后续处理单元膜,导致膜通量降低,影响系统正常运行。有机废水处理技术路线如图 2 所示。

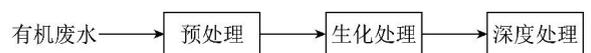


图 2 有机废水处理技术路线

Fig. 2 Route of organic wastewater treatment technology

## 3 有机废水处理

煤制气有机废水处理通常由“预处理+生化处理+深度处理”组成,该废水主要特征是:① 高

### 3.1 预处理

预处理主要去除废水中的悬浮物、油、沉淀物等杂质,满足生化处理要求,保证生化处理稳定性,一般采用调节、沉淀、隔油、气浮等工艺。如果废水可

生化性差,可采用化学氧化法、电解法或水解酸化等方法提高可生化性,以保证生化处理效果。

杜松等<sup>[13]</sup>提出了在酚氨回收后,生化处理前采用高级氧化提高废水可生化性的思路,并进行了试验研究。该方法对有毒难降解的煤化工废水处理具有可行性,不仅可以降低生化系统的建设及运行成本,还可以保护生化系统免于冲击,但成本是制约该技术推广的关键因素,有待根据具体废水水质优化工艺参数,提高技术经济性。

### 3.2 生化处理

废水生化处理技术主要有缺氧/好氧活性污泥法(A/O)、厌氧/缺氧/好氧活性污泥法(A/A/O)、

序批式活性污泥法(SBR)、内循环(IC)厌氧工艺、外循环(EC)厌氧工艺、生物倍增法(BioDopp),还有新发展的生物炭法(PACT)等。PACT法可大幅度提高难降解有机物的处理效果及硝化反应效率,并有效防止污泥膨胀,但同时也存在活性炭滤料与活性污泥混合浆液的脱水,需增加设备投资和能耗,粉状炭的再生成本高等问题。

对于鲁奇气化工艺所产废水建议采用厌氧/水解+二级A/O工艺,去除大部分酚、COD、氨氮、总氮等。对于粉煤炉或水煤浆炉气化所产废水建议采用二级A/O工艺,去除大部分氨氮、总氮。常见生化处理工艺方案对比<sup>[14]</sup>见表3。

表3 常见生化处理工艺方案对比<sup>[14]</sup>

Table 3 Comparison of common biochemical treatment processes<sup>[14]</sup>

项目	SBR工艺	EC厌氧+生物增浓工艺	A/O+活性焦吸附生化工艺
占地面积	大	中	中
投资费用	大	中	大
停留时间	较长	中	较长
生物产泥量	较大	较小	较大
生物泡沫	较大	较大	较大
优点	可根据水质特点灵活调节	生化停留时间短	去除色度和溶解性COD效果较好
缺点	池容利用率低、操作较复杂	生物增浓需要投加无机药剂	出水易跑焦,效果不稳定
运行业绩	义马气化厂、中煤榆林 MTO 项目	中煤图克、哈气化	大唐克旗

### 3.3 深度处理

废水经过预处理、生化处理后虽然去除了大部分污染物,但由于有多种难降解有机物的存在,有些出水指标(如COD、色度等)仍达不到排放或回用标准,还需深度处理。目前,深度处理技术主要包括吸附法、混凝沉淀法、高级氧化技术(Fenton氧化、O<sub>3</sub>氧化、催化湿式氧化等)、曝气生物滤池等。对于煤制天然气项目一般采用絮凝沉淀/气浮+高级氧化+深度生化+过滤、消毒等技术路线。

伊犁新天20亿m<sup>3</sup>/a煤制天然气项目废水设计处理能力1200m<sup>3</sup>/h,酚氨回收后废水水质COD质量浓度为3506mg/L,氨氮质量浓度为124mg/L,总酚质量浓度620mg/L,总油质量浓度115mg/L,BOD<sub>5</sub>/COD为0.33。预处理工艺为“均质+调节+隔油+气浮+水解酸化”,除去废水中的油,然后对水质进行调节;生化处理采用两级A/O工艺;深度处理采用“臭氧氧化+生物滤池+活性焦吸附”组合,经过上述工艺处理后,废水中残留COD质量浓度降至60mg/L,油质量浓度降至5mg/L以下,其工艺流程如图3所示。

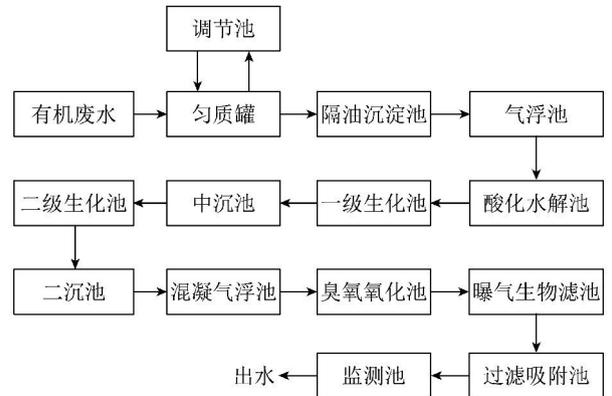


图3 伊犁新天煤制气有机废水处理工艺流程

Fig. 3 Process of organic wastewater treatment from Yili Xintian coal to methane

## 4 含盐废水处理

含盐废水处理是将有机废水处理出水、清净废水(主要是循环水站和脱盐水站的排污水)等大部分回用至循环水站作为补充水,回用至脱盐水站作为其水源等。回用水站的回收率为65%~75%,部分可提高至80%~85%,但需要做特殊的中间处理。

该单元来水水质特点:有机废水处理出水含有部分有机物,而清净废水则硬度高,建议将有机废水处理出水和清净废水分开处理。对于硬度高的清净废水需要考虑除硬,采用药剂软化;对于含有有机物的来水需做好杀菌,避免膜滋生微生物,反渗透前还原剂投加要充分,并选择抗污染膜等。含盐废水处理方法很多,如蒸馏、离子交换、膜处理,目前常采用双膜处理,技术路线为:软化澄清+过滤+超滤+反渗透。反渗透膜在水通量、脱盐率、脱除有机物和抗生物降解方面表现出极高的性能,处理出水 TDS 浓度一般在  $10 \text{ g/L}$  [15]。

## 5 浓盐水处理

含盐废水经反渗透膜处理后,70%左右的水回用,剩余的浓盐水水量仍然较大,需进一步浓缩减量,使 TDS 质量浓度达到  $50 \sim 80 \text{ g/L}$ ,减少蒸发结晶的规模,节约投资和能源消耗。浓盐水浓缩处理方法主要有常规反渗透(RO)、高效反渗透(HERO)、高压膜技术、震动反渗透膜浓缩法和电渗析技术等。

常规反渗透对浓盐水处理的问题在于膜表面易结垢,清洗次数频繁,产水率仅为 70% 左右。高 COD 可能引起膜污染、蒸发器大量起泡、抑制晶体生长,限制了废水进一步浓缩或资源化利用。段锋等 [7] 提出了“混凝+活性炭吸附”联用工艺处理煤化工高含盐废水的工艺,并对不同混凝剂及活性炭投加量、不同初始 pH 等条件下的 COD 去除率进行试验研究。结果表明,该工艺可以有效去除煤化工高含盐废水 COD。

震动反渗透膜浓缩法针对普通反渗透膜浓缩易出现堵塞和膜表面结垢等问题而设计,通过膜震动,防止盐分在膜面产生结晶。在高盐浓度下,结晶和未结晶的盐分被推到浓液口外排。震动膜水回收率可以达到 80%~90%,浓液 TDS 浓度可达  $100 \text{ g/L}$ ,有效减少了后续蒸发结晶工艺的处理量。

虽然处理方法很多,但都需要考虑有机物污染、硅结垢、硬度结垢等问题,为了提高系统的稳定性,应做好预处理,可通过药剂和离子交换彻底去除硬度,避免膜结垢以及蒸发结晶结垢;通过物理化学方法脱除 COD,避免膜污染和结晶盐污染。

## 6 高浓盐水处理

高浓盐水通过蒸发进一步提浓,通过结晶器将盐结晶,蒸馏水回用,实现水的零排放。蒸发技术主

要有多效蒸发(MED)和机械压缩再循环蒸发(MVR)。经蒸发器浓缩处理后排放的浓缩废水, TDS 含量高达  $300\ 000 \times 10^{-6}$ ,通常被送往结晶器或干燥器,结晶成固体,进行安全填埋。

MED 低温多效蒸发浓缩结晶系统是由相互串联的多个蒸发器组成,低温( $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右)加热蒸汽被引入第一效,加热其中的料液,使料液产生比蒸汽温度低的近等量蒸汽。产生的蒸汽被引入第二效作为加热蒸汽,使第二效的料液以比第一效更低的温度蒸发,这一过程直至重复到最后—效。第一效凝水返回热源处,其他各效凝水汇集后作为淡化水输出,一份蒸汽投入,可以蒸发出多倍的水。料液经过第一效到最末效的依次浓缩,在最末效达到过饱和和结晶析出。随着效数的增加,一次蒸汽消耗量不断减少,考虑到设备投资的问题,一般最多做到四效,实际生产中双效蒸发和三效蒸发应用广泛 [16-17]。

MVR 机械蒸汽再压缩循环蒸发技术是根据物理学原理,等量物质从液态转变为气态的过程中,需要吸收定量的热能。当物质再由气态转为液态时,会放出等量的热能。根据这种原理,用这种蒸发器处理废水时,蒸发废水所需热能由蒸汽冷凝和冷凝水冷却时释放的热能提供。运作过程中消耗的仅是驱动蒸发器内废水、蒸汽、冷凝水循环和流动的水泵、蒸汽泵和控制系统所消耗的电能。MVR 的综合能耗(约  $400 \text{ MJ/t}$ )仅为 MED(约  $1\ 200 \text{ MJ/t}$ )的 30%,代表今后蒸发工艺的发展方向,尤其是对无蒸汽来源的厂家更宜采用。

## 7 结晶盐处理

结晶杂盐不但包括多种无机盐成分,还包括难降解有机物,大唐克旗煤制天然气项目结晶得到固体杂盐,经分析主要含有苯类、吡啶、酯类和杂环类等难降解有机物。由于煤化工结晶盐产生量大,处理占地面积大,且不易固化,具有极强的可溶性,容易造成二次污染。因此从加强环境保护的角度出发,应将煤化工废水处理结晶杂盐列入危险废弃物,并严格管控。

煤化工结晶杂盐作为危险废弃物需通过固化/稳定化预处理后进行填埋。常用固化技术有水泥固化、凝硬性材料固化、热塑性微包胶、热固性微包胶、大型包胶、自胶结固化和玻璃固化等。但是结晶盐极易溶于水,不易固化,环境隐患严重,目前尚无成熟的技术。目前思路是将  $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  分离处理,

资源化利用,剩余的杂盐、COD以及其他成分合并成杂盐结晶。分盐结晶工艺目前还处于实验室开发或中试阶段,尚未有企业真正通过蒸发结晶工艺将高浓盐水结晶分离出纯净的NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。

无论采用何种方法,煤化工结晶杂盐需按照危险废弃物管理和处置,避免填埋后结晶盐淋溶,同时防止30~50 a后固化措施及防渗措施老化造成填埋的杂盐泄漏,成为重大环境隐患。

## 8 结语与展望

我国煤化工处于快速发展阶段,已建和在建的煤化工项目超过50个,2013年以来获得国家发改委批准开展前期工作的煤化工项目达32个,煤化工废水的处理、回用与资源化利用迫在眉睫,相关关键技术具有广阔的应用前景。

煤制天然气及煤化工废水零排放处理发展的主要趋势是:①通过生产系统与水系统的优化,研究废水处理与利用的新途径,实现废水减量;②进一步提高酚氨回收过程的回收效率及装置稳定性,降低运行成本;③开发抗毒生化技术,提高有机物去除效率并降低成本;④研发高性能、抗污染膜材料,形成新工艺,提高膜浓缩倍率并降低成本;⑤开发经济、可靠的浓盐水脱除COD技术,解决COD对结晶盐的污染问题;⑥开发高回收率、高纯度的分盐结晶工艺;⑦形成煤化工废水结晶盐产品标准,促进废水结晶盐资源化利用。

废水零排放是个系统工程,采用高效的水处理技术处理高浓度有机废水及含盐废水,将无法利用的高盐废水浓缩成固体安全储存,在一定程度上解决了水资源短缺的问题,也有利于保护当地的生态环境。

### 参考文献(References):

[1] 陈庆俊. 鲁奇炉气化废水处理工艺突破方向探讨[J]. 化学工业, 2012, 30(12): 9-13.  
CHEN Qingjun. Exploration of breakthroughs in lurgi gasification wastewater treatment process [J]. Chemical Industry, 2012, 30(12): 9-13.

[2] ZHANG Wenqi, RAO Pinhua, ZHANG Hui, et al. The role of diatomite particles in the activated sludge system for treating coal gasification wastewater[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(1): 167-170.

[3] 王吉坤, 董卫果, 杜松, 等. 气化废水络合萃取脱酚影响因素的研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2015(8): 39-43.

[4] 高明龙, 陈贵锋, 董卫果, 等. 基于磷酸三丁酯络合萃取法的脱

酚机理研究[J]. 煤化工, 2016, 44(4): 56-59.

GAO Minglong, CHEN Guifeng, DONG Weiguo, et al. The mechanism research of complexation-extraction phenol removal based on tributyl phosphate[J]. Coal Chemical Industry, 2016, 44(4): 56-59.

- [5] 董卫果. 煤化工废水中苯酚的络合萃取机理及模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2106-2112.  
DONG Weiguo. Complex extraction mechanism and model of phenol of coal chemical wastewater[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2106-2112.
- [6] 陈贵锋, 董卫果, 王吉坤, 等. 一种高效脱酚萃取剂及其在含酚废水中的应用: 201510590378. 6[P]. 2015-05-20.
- [7] 段锋, 董卫果, 田陆峰, 等. 煤化工高含盐废水去除有机物研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2016(4): 21-24.
- [8] 权秋红, 张建业, 石维平, 等. 一种盐分质装置: CN20162052073 9. X[P]. 2016-08-15.
- [9] 陈业钢, 吴晓华. 一种改进型低能耗煤化工浓盐水分质结晶组合装置: CN201520532911. 9[P]. 2015-10-12.
- [10] 秦江艳, 刘耀明, 曹文晋, 等. 碎煤加压气化酚氨回收技术工艺探讨[J]. 能源化工, 2015, 36(6): 14-19.  
QIN Jiangyan, LIU Yaoming, CAO Wenjin, et al. Study on phenol ammonia extraction technology of the crushed coal pressurized gasification [J]. Energy Chemical Industry, 2015, 36(6): 14-19.
- [11] 钱宇, 盖恒军, 江燕斌, 等. 单塔加压汽提处理煤气化废水的方法及其装置: 200610036072. 7[P]. 2009-05-06.
- [12] 张爱民, 刘继东. 鲁奇煤气化废水处理流程优化与实施[J]. 煤化工, 2013, 41(2): 43-46.  
ZHANG Aimin, LIU Jidong. Optimization and implementation of the wastewater treatment process for the lurgi coal gasification system [J]. Coal Chemical Industry, 2013, 41(2): 43-46.
- [13] 杜松, 王吉坤, 董卫果, 等. 紫外-芬顿方法提高两段炉气化废水可生化性的研究[J]. 新疆环境保护, 2015, 37(3): 27-32.  
DU Song, WANG Jikun, DONG Weiguo, et al. Using UV-fenton treatment to improve the biodegradability of two-stage gasification wastewater [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2015, 37(3): 27-32.
- [14] 刘志学. 煤化工废水处理技术运行实况调研[J]. 煤炭加工与综合利用, 2016(2): 11-14.
- [15] 曲凤臣. 煤化工废水“零排放”技术要点及存在问题[J]. 化学工业, 2013, 31(2/3): 18-24.  
QU Fengchen. The key technologies and problems of wastewater zero discharge in coal chemical industry [J]. Chemical Industry, 2013, 31(2/3): 18-24.
- [16] 赵鹏, 孙军, 李成, 等. 多效蒸发与热压缩技术在制盐行业中的应用[J]. 苏盐科技, 2007(4): 1-2, 4.
- [17] 张雷, 麻翠云. 浅析多效蒸发在烧碱浓缩中的应用[J]. 广东化工, 2012, 39(6): 131-132.  
ZHANG Lei, MA Cuiyun. Utilizing of multiple-effect evaporator method in caustic soda [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(6): 131-132.