

煤化工废水深度处理与资源化利用的经济性分析

马 刚 (国家能源集团宁夏煤业有限责任公司, 宁夏 银川 750000)

摘要: 煤化工废水因成分复杂、污染物浓度高且难以处理, 对环境和资源利用提出了巨大挑战。研究分析了煤化工废水的主要来源和特性, 归纳了主流处理技术, 包括生物处理、化学处理、物理吸附及膜分离技术。结合废水资源化利用的需求, 探讨了中水回用技术及资源化产品开发的路径, 提出废水深度处理与资源回用的综合解决方案。通过对某典型煤制气项目的废水处理工程案例研究, 验证了“近零排放”设计的可行性及经济性。

关键词: 煤化工废水; 深度处理; 资源化利用; 回收技术; 经济性

0 引言

我国的能源结构以煤为主, 随着经济的发展, 我国的煤化工行业得到了迅速的发展。由于我国是一个缺水的国家, 在煤化工生产过程中会产生大量的废水, 如果不能进行有效处理, 会给生态环境带来严重的危害。目前, 我国大多数煤化工企业都采用传统方法处理废水, 即对废水进行简单过滤、沉淀、消毒等处理后排入到环境中。随着环境问题越来越受到关注, 为了响应国家环境保护政策, 许多企业都开始重视废水处理。但传统方法中存在着处理成本高、效率低等问题。为了解决这些问题, 需要采用新技术对煤化工废水进行深度处理并实现资源化利用。

1 煤化工废水特性及来源

1.1 煤化工废水特性

煤化工废水是一种成分复杂且污染负荷高的工业废水, 其主要特点是污染物种类多、浓度高、难降解。废水通常包含多种有机污染物、无机盐类及重金属离子, 同时还具有高毒性和显著的色度。废水的这些特性决定了处理方法需要针对性设计。

①废水成分复杂。煤化工废水中包含挥发酚、氰化物、多环芳烃及其他难降解有机物。这些物质的化学结构稳定, 常规处理方法难以达到理想的去除效果; ②高浓度污染物特点。高氨氮含量和化学需氧量(COD)是煤化工废水的显著特征。这些污染物不仅影响废水排放标准, 还对生态环境造成严重威胁; ③可生化性差。煤化工废水中的毒性有机物对微生物活性产生抑制作用, 导致其生化降解效率较低; ④色度和浊度高。煤化工废水通常具有较高的色度和浊度。色度主要来源于芳香族化合物, 而浊度则与悬浮颗粒物及油类污染物相关。

1.2 废水来源分析

煤化工废水的产生过程贯穿煤的加工与转化全流

程, 包括煤制气、煤制油及煤焦化等工艺环节。每个环节产生的废水成分和特点不同, 需分别处理。

①煤制气工艺主要通过气化和净化步骤将煤炭转化为合成气。在这个过程中, 产生的废水含有大量氨氮、硫化物及挥发酚等污染物。其中, 氨氮来自气体净化环节的洗涤水, 而挥发酚则来源于煤中的有机成分裂解后的产物。此类废水的悬浮物含量较高, 需通过沉淀或过滤进行预处理, 随后采用深度净化工艺去除溶解性污染物; ②煤制油过程的废水。煤制油过程生成的废水主要含有芳香族化合物、重金属及有机溶剂。这些污染物浓度高、毒性强, 对废水处理的技术要求较高; ③煤焦化过程的废水。煤焦化废水是煤化工废水中污染物种类最复杂的一类, 主要包括酚类化合物、氰化物、氨氮及多种有毒有害物质(典型焦化废水组成及含量见表1)。这类废水需经过多级处理才能实现达标排放或回用。

表1 典型焦化废水组成及含量

成分	含量/(mg/L)	成分	含量/(mg/L)
挥发酚	1000	COD	3000~6000
氨氮	100~1600	氰化物	8~60
苯类	40	吡啶	10
噻吩	5	联苯类	8

2 煤化工废水主流处理技术

2.1 生物处理技术

生物处理技术利用微生物的代谢作用将废水中的有机污染物降解为无毒或低毒的物质, 是煤化工废水处理中常用的方法之一。该技术以生化处理池为核心, 主要包括厌氧处理、好氧处理及其组合工艺。

厌氧处理主要通过厌氧微生物将高分子有机物分解为小分子有机酸、甲烷等气体。该技术适合高浓度废水处理, 运行成本较低, 但启动时间较长。好氧处理通过需氧微生物进一步降解有机物, 常采用活性污

泥法或膜生物反应器。组合工艺如厌氧-好氧工艺,可有效提高难降解有机物的去除率,同时降低氨氮和总有机碳(TOC)浓度。

生物处理的优点在于运行费用低、技术成熟,但对可生化性差的煤化工废水处理效果有限。改良型工艺如序批式反应器和厌氧氨氧化技术已在部分工程中展现出较高的适用性。目前,工业应用最广泛的是生物脱氮工艺,包括好氧生物脱氮和厌氧氨氧化两种方法。好氧生物脱氮工艺在实际运行中存在一系列问题,如工艺处理能力低、碳源不足、污泥量大等。在煤化工废水处理中,好氧生物脱氮工艺的研究也取得了一定进展。

近年来,新型反应器如SBR反应器、微动力生物反应器、接触氧化-微动力生物反应器等,在废水处理领域得到广泛应用。这类反应器可根据废水水质特点采用不同的工艺参数,有效提高了生化处理效果。如BR/O工艺,即在SBR池中同时投加营养物和污泥,从而改善污水的可生化性,使其更容易达到高浓度废水的处理要求。

2.2 化学处理技术

化学处理技术通过化学反应去除废水中的污染物,常用于深度处理环节,以满足更高的排放标准或回用要求。该技术以氧化、还原、中和或沉淀反应为主要方式,具有反应迅速、效果显著的特点。

氧化法是化学处理的核心,包括臭氧氧化、高级氧化(如芬顿试剂)及催化湿式氧化。这些方法对废水中的难降解有机物具有较好的去除能力,但氧化剂的消耗和成本较高。沉淀法适用于去除废水中的重金属离子及部分无机盐类,通过添加絮凝剂和助凝剂形成沉淀物,降低水中污染物浓度。还原法通常应用于处理含高毒性化合物的废水,如含铬废水的还原处理。

化学处理工艺操作灵活,能适应多种废水特性,但其经济性受到药剂成本和二次污染风险的制约。因此,化学处理通常与其他工艺结合使用,在整个处理流程中起补充作用。化学处理技术可单独使用,也可与其他工艺相结合使用。例如,利用活性炭吸附去除废水中的氨氮,利用氧化技术去除废水中的COD,利用化学絮凝技术去除废水中的SS,或在生物处理单元前先进行化学处理,降低生化单元的COD负荷,为后续生物处理创造条件。随着现代煤化工行业的发展,废水成分复杂、污染物浓度高、处理难度大等问题日益突出。煤化工企业应结合自身实际情况,积极开发新工艺、新技术来解决废水处理难题,实现废水的高

效处理及资源化利用。同时,建立完善的废水处理工艺和运行管理体系也是实现煤化工企业可持续发展的必要前提。

2.3 物理吸附技术

物理吸附技术通过吸附剂表面的物理作用力吸附污染物,适用于煤化工废水中溶解性有机物及部分无机污染物的去除。该技术以吸附剂为核心,吸附剂的选择和处理方式决定了其效率与经济性。

吸附剂类型包括传统吸附材料和新型材料。传统吸附材料如活性炭因其高比表面积和良好的吸附能力被广泛使用,但使用寿命有限,且再生过程存在能耗问题。新型吸附材料如改性沸石、纳米材料及聚合物基材料具有更强的吸附能力和选择性,可显著提高污染物的去除率。

物理吸附的主要原理是利用吸附剂与污染物之间的范德华力,将污染物从水中分离。此技术无需复杂设备,操作简单,适合处理废水中的低浓度污染物及深度净化。其局限性在于吸附饱和后需更换或再生吸附剂,再生过程可能增加运营成本并引发二次污染。经济性分析表明,该技术适用于小规模或特定场景的煤化工废水处理。

2.4 膜分离技术

膜分离技术利用选择性透过膜将污染物从废水中分离,是一种高效且灵活的处理方法。该技术涵盖反渗透、纳滤、超滤及微滤等多种分类,具体选择取决于污染物种类及处理目标。

反渗透膜可去除废水中的溶解性盐类及大部分有机污染物,适用于废水的深度处理及回用工艺。纳滤膜针对中等分子量污染物,兼具脱盐及有机物去除功能。超滤膜和微滤膜则以分离悬浮颗粒物及大分子有机物为主,通常用于预处理阶段。

膜分离的核心是选择性透过膜,其工作原理基于压力驱动下的分子筛分效应。膜分离技术具有高分离效率、小占地面积及模块化设计的特点。然而,膜污染是其主要问题,包括生物污染、化学污染及物理堵塞。膜清洗和更换增加了运行成本,影响了经济性。结合实际应用,膜分离技术适用于水质要求高的场景,在煤化工废水回用中具有良好前景。膜分离技术对高硬度、高矿化度及高盐分的废水具有良好的脱盐效果。然而,膜污染是影响膜分离技术应用效果的主要问题。膜污染一般分为机械性膜污染和化学性膜污染,机械性膜污染多为滤饼层,化学性膜污染主要由离子交换树脂等引起。不同的污染物性质决定了不同的脱盐方

式,而化学性膜污染通常可通过膜清洗去除。

目前,膜法是煤化工废水深度处理及资源化利用的主流方法,但还需解决以下问题:第一,膜法处理技术存在能耗高、运行费用高的问题,在煤化工废水深度处理中需进一步优化;第二,膜法工艺会产生大量浓盐水,对后续回用系统提出了挑战。

3 煤化工废水资源化利用的经济性

3.1 废水回收利用的经济性

废水回收利用技术通过对废水的深度处理,使其达到特定水质标准,再回用于工业或非饮用场景,有效减少对新鲜水资源的依赖,同时降低废水排放对环境的压力。

中水回用作为煤化工废水回收的主要路径,应用了膜分离、生物处理和高级氧化等组合技术,能够高效去除废水中的溶解性污染物和悬浮颗粒物。处理后的废水可作为工业冷却水和锅炉补水,显著减少对清洁水源的需求。对于水质要求较低的场景,如地面清洁和绿化灌溉,处理后的废水同样适用。

部分经过适当处理的废水还可用于农业灌溉,在满足标准的前提下助力农业可持续发展。中水回用技术在节约水资源的同时展现出良好的经济效益,为煤化工企业提供了稳定的循环水资源利用方案。

3.2 资源化产品的开发应用经济性

资源化产品的开发通过从废水中提取有价值的物质或进行能源转化,实现污染物的二次利用。煤化工废水中的酚类、氨氮、有机酸等主要的可回收资源。

酚类化合物提取技术利用萃取剂从废水中分离酚类物质,这些物质可用于化工生产或作为燃料添加剂。氨氮的资源化利用主要通过吹脱或化学转化,生成硫酸铵、硝酸铵等肥料产品。

废水中的溶解性有机物还能通过厌氧发酵转化为甲烷或氢气,作为清洁能源供工业使用。这种能源回收技术依赖于厌氧消化的高效运行,初期设备投入较大,但可显著降低运行成本,适合大型煤化工企业应用。资源化产品的开发提升了废水处理的经济效益,同时减少了废水的环境污染负荷。

4 某典型煤制气项目废水处理工程利用经济性案例

以国内某大型煤制气企业废水处理工程为案例,该工程针对每小时产生的不同类型废水—— 360m^3 高浓度酚氨废水、 240m^3 循环排污水、 200m^3 生活污水、 300m^3 脱盐水处理站排水以及 25m^3 锅炉排污水——采用了适应“近零排放”标准的设计措施,应对自然条件的

限制。

项目中,BGL气化炉作为主要装置,虽工艺废水量少,却因含有复杂的有机物成分如酚类、 NH_4^+-N 、多环芳烃、苯系物和油类,其处理难度大,污染严重。为此,生化处理阶段引入了EBA多级生物组合技术,应对废水的高有机物含量。

尽管生化处理后废水的含盐量较高,通过将其与锅炉排污水和循环水排污水等混合,并经过预处理及反渗透工艺,最终使净化水符合脱盐水的标准,实现了76.6%的盐回收率。中水回用系统的浓盐水通过浓缩蒸发和结晶处理,达到了90%以上的水回用率和75%以上的盐回收率,从而完全满足了“零排放”的设计目标。

每日处理废水总量为:

$$(360+240+200+300+25)\text{m}^3/\text{h} \times 24\text{h}=27,060\text{m}^3/\text{天}$$

通过废水回用,超过90%的废水被循环利用,节约新鲜水用量为:

$$27,060\text{m}^3/\text{天} \times 90\%=24,354\text{m}^3/\text{天}$$

考虑到当地水资源匮乏,新鲜水的采购和输送成本较高,节约的水费对项目的经济效益贡献显著。

5 结语

针对复杂污染物的多样性和高难度处理问题,不同技术的联合应用展现了良好的适应性和效率。生物处理、化学处理、物理吸附及膜分离技术在不同阶段发挥了各自的优势,为深度净化提供了有效的技术支撑。资源化利用方面,通过中水回用和高效回收酚类、氨氮等有价值物质,不仅减少了废水的环境负荷,还提升了废水的经济效益。典型煤制气项目的实践表明,科学设计和合理配置工艺流程可以显著提高废水处理系统的运行效率。通过多方位的技术探索与优化,煤化工废水处理实现了水资源的高效循环与污染物的安全控制。

参考文献:

- [1] 张雪琴,陈树华,付艳鹏,等.煤化工企业废水处理及资源化利用技术研究及应用[J].山西化工,2024,44(03):213-216.
- [2] 卜凡.煤化工生产废水零排放技术路径及关键技术研究[J].清洗世界,2024,40(05):99-101.
- [3] 姜晓刚.煤化工废水零排放技术的选择应用[J].山西化工,2022,42(05):168-170.
- [4] 马学成,孟凡凯.煤化工废水资源化回收及深度处理技术[J].化工管理,2022(014):91-93.