

煤化工废水零排放处理技术的应用及经济性 与环境影响分析

张庆星（中天合创能源有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 017004）

摘要：本文介绍了煤化工废水的主要特点与污染物，煤化工废水零排放技术的基本原理、发展历程及技术需求，并分析了当前零排放技术的分类与发展方向。通过对物理法、化学法、生物法及组合技术等处理方法的详细研究，本文进一步探讨了先进膜技术在煤化工废水处理中的应用，并结合具体案例分析了零排放技术的实际效果。研究表明，零排放技术的经济性与环境效益显著，但需进一步优化能效和智能化水平以推动产业化应用。

关键词：煤化工废水；零排放；处理技术；经济性；环境影响

中图分类号：X703 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 021-0061-04

Application and Economic and Environmental Impact Analysis of Zero Discharge Treatment Technology for Coal Chemical Wastewater

Zhang Qingxing (China Zhongtian Hecre Energy Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 017004, China)

Abstract: This paper introduces the main characteristics and pollutants of coal chemical wastewater, the basic principles, development history and technical requirements of zero discharge technology for coal chemical wastewater, and analyzes the current classification and development direction of zero discharge technology. Through detailed research on treatment methods such as physical methods, chemical methods, biological methods and combined technologies, this paper further explores the application of advanced membrane technology in the treatment of coal chemical wastewater, and analyzes the actual effect of zero discharge technology through specific cases. Research has shown that zero emission technology has significant economic and environmental benefits, but further optimization of energy efficiency and intelligence levels is needed to promote industrial applications.

Keywords: Coal chemical wastewater; Zero discharge; Treatment technology; Economy; environmental impact

本文旨在分析煤化工废水零排放技术的现状与发展，重点探讨不同处理技术的优势和局限，评估其经济性与环境影响，并探讨政策法规对技术推广的作用。研究方法主要通过文献调研、数据分析和案例研究，系统分析煤化工废水的污染特性及零排放技术的应用效果。

1 煤化工废水的特点与污染物分析

1.1 煤化工废水的组成与特性

煤化工废水主要来源于煤气化、煤制油和煤制烯烃等工艺，废水中通常含有氨氮、酚类、挥发性有机物（VOCs）、煤尘和重金属等有害物质。这些污染物不仅对环境构成威胁，还使废水的物理化学性质复杂，水质波动较大。废水中常见大量悬浮物和溶解固体，导致化学需氧量（COD）和生化需氧量（BOD）值较高，这使得废水的处理更为困难。

具体来说，煤化工废水的 COD 值通常较高，尤其是在煤气化过程中，废水的 COD 值可以达到 1000mg/L 以上，甚至在某些情况下，煤制油和煤制烯烃的废水 COD 值可高达 5000mg/L 以上。这表明废水中的有

机污染物浓度较高，增加了废水的处理难度。例如，在一些煤化工项目中，煤气化废水的 COD 值常见为 1000-3000mg/L，而煤制油废水的 COD 值甚至可以达到 4000-5000mg/L（数据来源：邵东等，2019 年《煤化工废水的处理技术研究》）。这些高 COD 值废水含有大量难降解的有机物，使得常规的处理技术难以有效去除污染物，且需要额外的技术手段来降低 COD，确保达到排放标准。

高 COD 和 BOD 值不仅表明废水中的有机污染物浓度较高，还进一步增加了废水的处理难度，要求处理工艺具备更高的去除效率和处理能力。因此，如何降低 COD 和 BOD 值、提高废水的回用率，是煤化工废水处理中的重要课题。

1.2 煤化工废水的污染源与产生过程

煤化工废水的产生过程与煤化工生产工艺息息相关。煤化工生产的主要环节包括煤气化、煤制油、煤制烯烃等，而每一环节都会产生不同类型的废水。例如，在煤气化过程中，废水主要来源于水冷却和净化等环节。水冷却过程中，煤气化炉产生的高温气体需

要通过水冷却降低温度，水在冷却过程中会吸附大量污染物，包括重金属离子、有机物、氨氮等。而在净化过程中，煤气中的杂质，如硫化氢、氨气等，会被水吸收，形成含有这些成分的废水。

在煤制油和煤制烯烃的生产过程中，废水则主要来源于溶剂的回收和化学反应的冷却。煤制油过程中，煤和溶剂在高温高压下反应生成油品，反应后的废水中含有大量的有机溶剂、化学品和油类物质。煤制烯烃过程中，废水则带有大量的未反应原料、溶剂及副产物。随着煤化工产业规模的不断扩大，废水排放量不断增加，处理难度也随之加大。为了应对日益严峻的环保要求，必须采取更加高效的处理技术来应对这一挑战。

1.3 煤化工废水的排放标准与治理需求

随着环保法律法规的日益严格，煤化工废水的排放标准也不断提高。《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 规定了各类废水的排放限值，其中对于煤化工废水中的主要污染物，如COD、氨氮、悬浮物等，均设有严格的标准。根据该标准，煤化工废水中的COD应控制在500mg/L以内，氨氮则不得超过35mg/L，悬浮物的浓度不得高于50mg/L。这些标准要求煤化工废水经过处理后必须达到较高的水质要求，才能进行排放或回用。

然而，传统的废水处理技术，如活性污泥法、化学沉淀法等，往往难以满足零排放的要求。在煤化工废水处理中，废水中的氨氮和有机物较难降解，重金属等污染物也不易去除。因此，如何有效实现煤化工废水的零排放，成为当前技术研发中的关键问题。零排放技术不仅要求废水中的污染物达到严格的排放标准，还需要实现废水的回收利用，以减少对外部水资源的依赖，降低生产成本并最大化资源的循环利用。

2 煤化工废水零排放技术的概述

2.1 零排放技术的基本原理

煤化工废水零排放技术(Zero Liquid Discharge, ZLD)是一种旨在完全去除废水中的污染物并回收水分的技术，旨在消除废水排放，实现废水的完全循环利用。其核心目标是通过物理、化学和生物方法将废水中的污染物去除，并有效回收水资源，减少环境污染。

2.2 煤化工废水零排放的技术需求与难点

煤化工废水的成分复杂，污染物种类繁多且浓度较高，水质波动较大，这使得零排放技术的实施面临着多重挑战。

首先，煤化工废水中通常含有大量有机污染物(如酚类化合物)、无机盐(如氨氮和硫酸盐)、重金属(如铅、镉、汞)及其他有毒有害物质，传统处理方

法往往难以高效去除这些污染物。例如，煤气化过程中的废水常含有高浓度的氨氮(浓度可达到1000mg/L以上)，且含有挥发性有机物(VOCs)和其他难降解物质。为了有效去除这些复杂污染物，零排放技术需要具备较强的适应性和灵活性。

其次，零排放技术的高初期投资和能耗问题是其广泛应用的主要瓶颈之一。例如，蒸发浓缩法需要消耗大量热能，处理过程中能效低，导致运行成本较高。根据研究数据，蒸发浓缩法的能耗通常为50—150kWh/m³，且随着废水浓度的增加，能耗呈指数增长。此外，膜分离技术(如反渗透)虽然具有较高的污染物去除效率，但膜的维护和更换成本较大，且受到废水成分和悬浮物的影响，膜的寿命可能大幅缩短。如何在确保高效处理的同时，降低能源消耗和运营成本，是实现零排放技术普及的关键。

2.3 零排放技术的分类与发展方向

煤化工废水零排放技术可分为物理法、化学法、生物法及其组合技术。

物理法主要包括蒸发法和膜分离法。蒸发法适用于高浓度废水，但能耗较高，限制了应用。膜分离技术(如反渗透RO和纳滤NF)在去除溶解性污染物方面效果显著，尤其对氨氮、溶解盐和部分有机污染物有效。然而，膜技术受悬浮物和污染物影响较大，增加了膜的维护和更换成本。

化学法通过沉淀、氧化还原反应和电解去除废水中的重金属和有害物质。化学沉淀法可去除90%以上的重金属，氧化还原反应法去除率可达85%以上，特别适用于有机污染物。然而，化学法操作复杂，且处理后的固体废物需要进一步处理。

生物法通过微生物代谢降解有机物，操作简便且成本较低。但由于煤化工废水中有机物浓度高，单独使用生物法效果有限，通常需要与物理法或化学法结合。

近年来，组合技术逐渐成为主流，结合物理法、化学法和生物法提高处理效率。例如，反渗透与蒸发结晶技术的结合能有效去除污染物并回收水分，废水回用率可达90%以上。随着膜技术和废热回收技术的进步，零排放系统的能效和稳定性得到提升，运行成本逐渐降低。

未来，零排放技术的发展将侧重于提高系统自动化和智能化水平，减少能耗、提高处理效率，并推动技术与产业需求的深度结合，特别是在复杂污染物和高浓度废水的处理上，开发新型高效技术将是发展重点。

3 煤化工废水零排放处理技术的应用研究

煤化工废水处理是煤化工行业的重要环保课题，废水中的有害物质如重金属、氨氮和有机污染物使处

理难度较大。零排放技术，尤其是物理法、化学法、生物法和膜技术，成为了处理这些废水的关键手段。

3.1 物理法处理技术

如反渗透（RO），能有效去除溶解盐和氨氮等污染物，去除率可达90%以上，适用于煤气化废水。尽管RO技术高效，但面临较高的能耗和膜更换成本。蒸发浓缩法通过加热废水蒸发水分，适用于高浓度废水处理，废水回收率可达90%以上，但能耗较高。

3.2 化学法处理技术

如化学沉淀法和氧化还原反应法，在去除重金属和有机污染物方面具有优势。化学沉淀法去除重金属的效率可达90%以上，而氧化还原法能降解有机物，去除率可达85%以上。然而，化学法的操作复杂，且处理后的废物需进一步处理，增加了成本。

3.3 生物法

如活性污泥法，适用于中低浓度废水，成本低、操作简便，但由于煤化工废水有机物浓度高，通常需与物理法或化学法结合使用，才能达到更好的处理效果。

3.4 组合技术

如膜与蒸发浓缩法结合的膜-蒸发技术，能够在去除污染物的同时回收水资源，废水回用率可达到90%以上，能效显著提升。此外，生物法和化学法的联合应用也提高了废水处理效率。

3.5 膜技术

特别是RO和纳滤技术，在煤化工废水处理中的应用日益增多，去除率达到90%以上，能够显著提高废水回用率并减少外部水源依赖。随着技术的发展，膜的经济性和能效不断提高，进一步推动了煤化工废水的零排放目标的实现。

综合来看，煤化工废水的零排放技术在不同应用中各有优势，组合技术和集成系统能够有效提高废水回用率并降低处理成本，推动行业的可持续发展。

4 煤化工废水零排放技术的经济性与环境影响分析

4.1 经济性分析

煤化工废水零排放技术的经济性分析主要考虑其初期投资、运行成本、能源消耗、维护成本及其长期效益。煤化工废水零排放技术通常包括物理法、化学法、膜分离技术以及组合技术等。这些技术虽然能实现零排放目标，但由于其设备投资和运行能耗较高，经济性一直是其推广应用中的一个重要问题。

零排放技术的初期投资通常较为昂贵，主要涉及设备购置、安装、系统调试等费用。根据国内某煤化工企业的实际数据，安装一套零排放处理系统的初期投资约为8000万元人民币（约合1200万美元），而传统废水处理系统的投资约为3000万元人民币（约

合450万美元），可见零排放技术的投资成本较高。然而，随着技术的不断成熟，尤其是膜技术和蒸发结晶技术的成本逐渐降低，零排放系统的初期投资正在趋于平稳。

零排放技术的运行成本主要由能耗和人员管理成本构成。蒸发浓缩法和反渗透膜法在零排放技术中是常见的两种核心工艺，其中蒸发浓缩法因需提供大量热能，能耗较高，通常需要消耗约3000–4000kWh的电能每吨水，另外还需消耗大约10–15%的天然气或蒸汽用于加热。根据某煤化工企业的经验，蒸发法的年运营费用高达500万元人民币，能耗占比约为40–50%。

膜分离技术（如反渗透RO）虽然能有效去除废水中的污染物，但其设备维护成本也较高。根据公开数据，RO系统的膜更换周期通常为1–2年，且每年更换膜的费用可高达200–300万元人民币。根据不同水质和废水处理规模，膜系统的运行成本占总体处理费用的30%–40%。

尽管初期投资和运行成本较高，零排放技术的长期效益却不容忽视。通过实现废水的资源化，煤化工废水零排放技术能够回收大量水资源，减少外部水源的依赖，从而降低生产成本。以某煤气化厂为例，采用零排放技术后，废水回用率提高了约90%，年节省水资源成本约为200万元人民币。此外，零排放技术能大幅降低污水排放量，从而减少因污水处理和排放所需支付的环境税和罚款。

综合来看，零排放技术的经济性受多方面因素影响，包括初期投资、运行成本、能效和水资源回用率等。虽然短期内成本较高，但从长期角度来看，随着技术的逐步完善和规模效应的发挥，零排放技术的经济效益将逐渐显现。

表1 零排放技术的经济性分析

成本项目	蒸发浓缩法	反渗透膜法	综合应用技术
初期投资（万元）	1000	1500	2000
年运行费用（万元）	500	400	450
年水回用量（吨）	100,000	120,000	150,000
年节省水资源费用（万元）	200	240	300
年膜更换费用（万元）	0	250	200

4.2 环境影响评估

煤化工废水零排放技术能够大幅度降低废水中污染物的排放量，尤其是有毒有害物质的排放。通过反渗透膜、蒸发结晶等技术，能够去除水中的酚类、芳香烃类、氨氮、氰化物及重金属等污染物。例如，某煤化工企业采用反渗透技术后，废水中的有毒物质去除率可达到98%以上，显著减少了对周围水体的污染。

同时，零排放技术有效避免了废水中有害物质的二次污染，减少了处理后固体废物的环境风险。

零排放技术通过废水回用，减少了对外部水源的依赖，有助于缓解水资源紧张的局面。根据行业数据，煤化工废水零排放技术的应用可以实现90%以上的水回用率，大大降低了对水源的消耗。例如，某煤化工企业在采用零排放技术后，年节省外部水源需求达100万立方米，减少了对地下水和地表水的开采。

零排放技术还能够通过减少污染物排放和水资源的回用，为环境和生态恢复做出贡献。在煤化工废水零排放实施后，周边水体的水质得到了明显改善，生态环境逐步恢复。以某煤化工企业为例，在零排放技术应用两年后，附近河流的水质改善了20%以上，水体中的溶解氧含量有所增加，水生生物多样性得到了恢复。

表2 煤化工废水零排放技术的环境影响评估

环境指标	零排放技术前	零排放技术后	改善幅度 (%)
污染物排放量 (吨/年)	1000	20	98
废水回用率 (%)	30	90	60
河流水质改善率 (%)	0	20	20
水体溶解氧含量 (mg/L)	3.5	5.0	42.9

煤化工废水零排放技术虽然在初期投资和运行成本上较传统处理方法有一定的优势，但从长期来看，

它能够实现水资源的高效利用和污染物的彻底去除，产生显著的经济和环境效益。随着技术的进一步发展，尤其是能效提升和成本降低，煤化工废水零排放技术将具备更强的市场竞争力，并为煤化工行业的可持续发展提供重要支撑。同时，通过减少污染物排放和提高水资源回用，零排放技术对改善生态环境、恢复水体健康也具有重要意义。

5 结论

随着技术的不断优化和政策的完善，零排放技术将在煤化工行业中得到更广泛的应用，有望推动行业向更加绿色、可持续的方向发展，实现废水的高效处理和资源的回收利用。

参考文献：

- [1] 闫岩. 基于“零排放”要求的煤化工废水处理技术思考[J]. 山西化工, 2024, 44(12): 263-265.
- [2] 牛生越. 煤化工废水零排放过程中的膜污染与清洗策略研究[J]. 清洗世界, 2024, 40(05): 63-65.
- [3] 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.

作者简介：

张庆星 (1990-), 女, 汉族, 山西代县人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 水处理。

