

高盐化工废水回用处理工艺及经济效益分析

万丹鸿（中石化江汉盐化工湖北有限公司，湖北 潜江 433122）

摘要：以某化工园区作为研究对象，阐述高盐化工废水的主要特征以及产生危害，并提出一系列切实可行的高盐化工废水回用处理工艺，包括利用双膜法，去除废水中的悬浮物及大分子有机物；依靠机械压缩再蒸发，实现水与盐的高度分离，搭配活性炭吸附工艺，去除废水中的重金属离子与异味。实际结果显示，处理后废水盐度低至 500mg/L 以下，化学需氧量低于 100mg/L、生化需氧量低于 20mg/L，满足国家废水排放标准。企业凭借废水回用工艺，保证每年净收益达到 500 万元以上，证明相关工艺具有极高推广价值。

关键词：化工园区；高盐化工废水回用；双膜法；经济效益；投资成本

中图分类号：X703

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）013-0056-03

Analysis on the process and economic benefit of reuse and treatment of high salt chemical wastewater

Wan Danhong(Sinopec Jianghan Salt Chemical Hubei Co.,LTD,Qianjiang Hubei 433122,China)

Abstract: Taking a chemical industry park as the research object, the main characteristics and hazards of high-salt chemical wastewater are described, and a series of feasible reuse and treatment processes for high-salt chemical wastewater are proposed, including the removal of suspended matter and macromolecular organic matter in wastewater by double-membrane method. Relying on mechanical compression and re-evaporation to achieve a high degree of separation of water and salt, with activated carbon adsorption process, remove heavy metal ions and odors in wastewater. The actual results show that the salinity of the treated wastewater is less than 500mg/L, the chemical oxygen demand is less than 100mg/L, and the biochemical oxygen demand is less than 20mg/L, which meets the national wastewater discharge standard. The annual net income of the enterprise with the wastewater reuse process reaches more than 5 million yuan, which proves that the process has a high promotion value.

Key words: chemical industry park; Reuse of high-salt chemical wastewater; Double film method; Economic benefits; Investment cost

高盐化工废水是指在化工生产阶段，产生的具有大量可溶性无机盐以及有机污染物的废水，具有含盐量高、成分复杂、处理难度大等特征。而实现此类废水的回收利用，能够有效缓解我国水资源短缺压力，满足化工行业部分生产阶段的用水需求，也能在一定程度上减轻水体污染，避免出现土壤盐碱化现象。

1 工程概况

根据实际调查显示，某城市化工园区主要生产有机化学品产品，多用于医药与涂料等领域。虽然企业配有先进的生产工艺以及精密的加工设施，但在生产阶段，仍会产生大量的高盐化工废水。究其原因在于，生产流程所涉及的化学反应类型繁多，比如在有机合成反应中，为促进产物分离，需要加入大量的无机盐类催化剂，通常每生产 1t 产品，便会产生约 6t 的高盐化工废水。其中盐分主要包括氯化钠、硫酸钠等。而在产品提纯阶段，由于要使用大量水完成洗涤作业，水在接触产品后，会迅速溶解部分盐分，进一步加剧高盐化工废水的形成。考虑到此类废水，无论是对水生态系统，还是对人体健康都存在极大危害，一旦直接排放至附近河域，很可能引发水生生物多样性锐减，

加剧土壤盐碱化，甚至造成土壤无法耕种的问题。为此，急需编制切实可行的废水回用处理方案。

2 高盐化工废水回用处理工艺

2.1 预处理工艺

该工艺的主要作用在于，去除废水中的悬浮物以及重金属等杂质，旨在减少废水的污染物浓度，为后续的脱盐处理以及深度处理，提供优质净水条件。以往常采用脱硫破氰 + 气浮的处理形式，但该方法需要投加特定的药剂，处理过程消耗的电能较大，经济成本较高。且一旦废水水质或是水量波动较高，都会在一定程度上影响脱硫破氰效果。因此，该化工园区更适合使用双膜法，即为结合超滤与反渗透两种膜分离技术的废水处理方法，其中超滤膜可依靠物理截留的方式，分离水中的大分子物质。而反渗透膜则用于去除溶解性盐类以及有机物，充分发挥半透膜的选择透过性特征，使水分子在压力作用下，经过反渗透膜将盐分、有机物截留在膜的一侧，达到水与溶质彻底分离的目的。具体预处理流程表现为：原水预处理，需要向原水中投加适量混凝剂，促进胶体与细微悬浮物凝聚成大颗粒，依靠沉淀的方式将其去除；采用由醋

酸纤维素、聚酰胺组成的中空纤维超滤膜，使原水从膜丝内部进入，透过膜丝壁，抵达外侧，充分发挥超滤膜的筛分作用，去除原水中的胶体、细菌，保留对人体有益的小分子物质；设置反渗透系统，使原水经过一次反渗透膜过滤，之后加入适量阻垢剂、杀菌剂，避免微生物滋生，保证盐分等杂质被有效截留，达到净化水质的目的。若产水酸碱值与实际要求不符，或是水中残留细菌、病毒较高，可通过加酸或加碱进行调节，搭配紫外线消毒以及离子交换树脂等方法，进一步提高水质纯度。双膜法的优势在于处理效率高、出水水质好，能够实现自动化作业及有价值物质的回收再利用。

2.2 脱盐处理工艺

脱盐工艺是废水回用的关键环节，其主要作用在于去除废水中的盐分，保证废水满足回用标准。以往该化工园区更倾向于使用多效蒸发技术，但在长时间使用后发现，该工艺需要采用多个蒸发器串联运行，设备结构较为复杂，无论是设备安装，还是后期维护，都存在成本较高的问题。且多效蒸发技术的操作难度较大，对水质要求偏高，过于依赖外部热源，在蒸发过程中，若废水中的有机物浓度较高，很容易造成蒸发结晶得到的盐夹带过多有机物，进而影响水的品质，也不利于后续的提纯处理。因此，该园区最终决定采用机械压缩再蒸发技术，实现脱盐处理。

该技术是指利用蒸汽压缩机，实现热源的高效利用，凭借蒸汽的二次压缩，获取动力，不断往复，保证蒸汽热利用效率的最大化，简单来说便是压缩蒸发器形成的二次蒸汽，通过提高其压力与温度，将压缩后蒸汽送回蒸发器，作为热源，达到蒸汽循环利用的目的，降低对外部新蒸汽的需求。具体的工艺流程表现为：废水预热，需要利用热交换器内的高温冷凝水与废水完成热交换，借助提高废水温度，减少后续蒸发环节的能源消耗，也有助于稳定蒸发过程；蒸发，需要在蒸发器内布置加热元件，使压缩后的高温高压蒸汽将热量传递至废水，使其在一定温度条件下沸腾蒸发，完成水分汽化，达到水与溶质彻底分离的目的，进一步获取纯净蒸馏水；蒸汽压缩，是指将从蒸发器出来的二次蒸汽通入压缩机，在叶轮与转子的作用下，增加蒸汽焓值，使其形成能量更高的过热蒸汽，作为热源，循环利用；冷凝，是指将二次蒸汽通入冷凝器，完成与冷却介质的热交换，直至二次蒸汽凝结成液态水，收集在冷凝器底部，完成最终的回收利用^[1]。

2.3 深度处理工艺

深度处理工艺的作用在于进一步去除废水中的残留污染物，保证废水安全排放，以往化工园区大多采

用臭氧氧化的深度处理形式。但考虑到生产臭氧的电耗较高，臭氧与有机物的反应无法将全部有机物彻底分解，且臭氧本身也是一种不稳定的强氧化剂，难以保证臭氧的高效利用，因此现阶段化工园区更适合采用活性炭吸附工艺。其原理在于借助活性炭巨大的比表面积以及微孔结构，对重金属离子以及有机物进行吸附去除。具体流程：吸附反应，需要将活性炭投入装有废水的搅拌容器中，实现两者的均匀混合，当废水与活性炭接触后，自然发生吸附反应。基于范德华力，使污染物分子吸附至活性炭孔隙；活性炭分离，需要采用过滤、沉淀等方式，搭配虹吸、泵抽，分离上层清液，利用活性炭自身重力，使其在容器中自然沉降，达到活性炭与水分离的目的；再生，是指恢复活性炭的吸附性能，实现活性炭二次利用，降低处理成本，有助于环境保护。该方法适用于低浓度、成分复杂的废水，优势在于吸附效果好，操作便捷。相较于传统的生物降解技术以及化学氧化技术，能够免受微生物生产条件的限制，占地面积更小，也不会产生二次污染，运行成本较低。且项目周边本身具有稳定的活性炭供应渠道，能够保障深度处理工艺的稳定运行。

3 高盐化工废水回用处理工艺应用效果分析

3.1 处理前后水质数据对比

根据实际调查显示，在高盐化工废水处理前，废水盐度接近 18000mg/L，究其原因在于生产阶段采用大量的无机盐类催化剂，且高压环境本身会抑制微生物的代谢，导致传统的废水回用处理工艺难以发挥实际作用。若直接排放，会进一步增加受纳水体的含盐量，破坏生态平衡。且根据监测结果显示，废水中的化学需氧量以及生化需氧量分别为 9000mg/L、3500mg/L，证明废水中的有机污染物含量较高，主要源于生产阶段的各类有机化学反应。此类有机物既会消耗水中的溶解氧，也会对生物产生毒性。至于水中的重金属离子含量，也远超安全标准，包括铅离子浓度 7mg/L、汞离子浓度 1mg/L。此类重金属的毒性较大，降解难度极高，无论是对生态环境，还是对人体健康都存在严重危害^[2]。

在采用上文的预处理工艺、脱盐工艺以及深度处理工艺后，能够使废水指标均低于安全阈值，其中盐度降低至 500mg/L 以下，能够满足工业用水需求。而化学需氧量以及生化需氧量则降至国家规定废水排放标准以内，证明有机污染物得到有效去除，至于铅离子、汞离子浓度则分别降至 0.1mg/L、0.001mg/L 以下。

3.2 工艺运行数据

从工艺运行角度分析，发现该化工园区在优化原

有的废水回用工艺后，能够保证 $600\text{m}^3/\text{d}$ 的水处理能力。在运行阶段，每天处理废水近 550m^3 ，在生产旺季，虽然废水产生量有所增加，但处理系统仍能稳定运行。且最高处理量可提升至 $630\text{m}^3/\text{d}$ ，证明水量处理能力良好。而在能耗方面，在预处理环节采用的双膜法技术，主要能耗来自水泵以及模组件，一般情况下，每处理 1m^3 的废水，需要消耗约 1.5 度的电能。而在脱盐阶段采用的机械压缩再蒸发，能耗偏高，主要集中在蒸汽压缩机的运行上，电耗大约在 $8\text{ 度}/\text{m}^3$ 。但与传统的多效蒸发技术相比，能耗降低约 30%，仍具有极高的经济效益。至于活性炭吸附工艺，能耗主要集中在活性炭的再生。通常每处理 1m^3 废水需要耗能 0.5 度。

总体来看，该化工园区高盐化工废水回用处理工艺，总电耗大约在 $10\text{ 度}/\text{m}^3$ 。最后从药剂用量方面分析，双膜法在实际应用过程中需要添加适量的絮凝剂以及杀菌剂，为避免微生物污染，絮凝剂的用量大约在 $50\text{g}/\text{m}^3$ ，杀菌剂的用量大约在 $10\text{g}/\text{m}^3$ 。脱盐阶段无需投放大量的化学药剂，只需增加适量的阻垢剂即可，用量约 $5\text{g}/\text{m}^3$ ，其主要作用在于避免蒸发器产生结垢，保障设备传热效率良好。在使用活性炭吸附时，同样无需使用化学药剂，但要对超滤装置以及反渗透装置进行定期冲洗，去除膜表面污染物，致力于提高膜的过滤效果。

4 高盐化工废水回用处理工艺经济效益

4.1 成本分析

本次工程项目中，主要成本可分为以下几类：设备投资，包括工艺设施以及辅助类装置，比如超滤膜组件，每支价格约 3000 元，累计需要 100 支。反渗透膜组件，每只价格近 4000 元，累计费用接近 32 万元。蒸汽压缩机的价格相对高昂，需要尽可能选用国际知名品牌，总价在 150 万元左右。活性炭价格则依照当前市场 4000 元/ t 进行计算，累计需要 20 万元。其他辅助装置，包括水泵、管道，可将费用控制在 50 万元，累计设备总投资接近 550~600 万元；建设成本，主要包含设备安装、土建工程，比如建设废水处理车间，要求占地面积超过 1500m^2 ，累计费用接近 300~400 万元，而设备安装需要将总费用控制在设备投资的 10% 左右；运行成本，主要集中在电能以及药剂等方面，结合分析可知，设备维护与维修成本，通常在 20~30 万元之间，至于每 m^3 废水的维修与维护成本仅 2 元；污泥处理成本，根据计算，本次项目中高盐化工废水回用处理工艺的污泥产量为 $6\text{t}/\text{d}$ ，可采用脱水、干化的形式，委托专业公司进行污泥集中处理，其中委托处置费用依照每吨污泥 800 元计算。

4.2 收益分析

项目收益集中在三方面：①水资源回用，由于工艺改造后，每天废水处理量可达 550m^3 ，废水回用率接近 85%。根据研究对象所在地区的工业用水价格计算，每年预计收益达到 150 万元；②盐类物质回收，经废水处理后，每天可回收大量氯化钠、硫酸钠，根据市场价格计算，盐类回收总收益接近 50 万元~70 万元；③减少排污费与罚款带来的间接收益，在未开展工艺优化前，该项目每天需缴纳排污费接近 15000 元，同时因废水排放不达标，往往面临高额罚款，单次罚款金额大约 20~30 万元之间。而在采用废水回用工艺后，废水质量能够满足安全标准，避免缴纳排污费的同时，也可免受高额罚款，间接收益大约在 400~500 万元之间。

4.3 效益评估

项目自工艺优化并投入运营后，每年的净收益主要表现在水资源回用、盐类物质回收以及减少排污费的间接收益，在减去项目设备投资成本、运行成本后，每年净收益接近 500~700 万元。可见，该项目的工艺优化措施切实可行，具有极高的参考价值。且各项工艺系统的自动化水平较高，可融合人工智能系统、数字化程序，打造在线管理平台，只需操作人员录入相关操作指令。并可协调机械装置的平稳运行，利用预设安全报警阈值，保证系统监控设备状态后，将监测结果与安全阈值自动比对，若数值偏差较大，则发出告警提示，由维护人员及时处理。在进一步提高作业效率的同时，减少了人工成本，消除潜在安全隐患。还能加快化工园区的智慧化、环保化、绿色化发展。

5 结论

通过对高盐化工废水回用处理工艺分析讨论，提出利用机械压缩再蒸发、双膜法以及活性炭吸附工艺，去除废水中残留的有机物、重金属离子、盐分以及悬浮物。保证处理后的高盐化工废水，能够实现回收再利用。研究结果显示，该方法有效降低企业的设备投资成本、建设成本以及污泥处理成本，每年水资源回用带来收益接近 150 万元，净收益超过 500 万元，项目投资回报期约 2~3 年，经济效益显著。

参考文献：

- [1] 王图雅, 陈帆. 高级氧化技术在废水处理中的应用研究 [J]. 清洗世界, 2024, 40(08): 106-108.
- [2] 袁闻, 李正宾. 臭氧催化氧化技术在化工废水处理中的应用 [J]. 化学工程与装备, 2024(07): 158-160+124.

作者简介：

万丹鸿 (1997—)，女，汉族，湖北监利人，硕士研究生，助理工程师，研究方向：盐硝装置工艺。