

浓海水提溴工艺的环境影响评价与低碳化转型路径综述

张腾飞¹ 刘忠忱¹ 李 腾¹ 宋建明¹ 付家伟¹ 刘 伟²

1. 恒力石化(大连)炼化有限公司 辽宁 大连 116318

2. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所 天津 300192

摘要: 文章聚焦浓海水提溴工艺,先阐述主流工艺流程与关键技术突破,包括高效节能装置、智能化系统及绿色氧化剂替代。接着从大气、水、土壤与生态、固体废物等方面开展环境影响评价。最后探讨低碳化转型路径,涵盖工艺优化创新、能源结构调整、循环经济模式构建、智能化数字化升级。旨在为浓海水提溴工艺的绿色可持续发展提供理论依据与实践参考,推动行业在降低环境影响的同时实现低碳转型。

关键词: 浓海水提溴;环境影响评价;生命周期评价(LCA);低碳技术

引言: 随着海洋资源开发利用的深入,浓海水提溴工艺在海盐化工及海水淡化副产资源利用中愈发重要。该工艺虽相较于传统海水提溴有优势,但仍存在流程复杂、能耗高、环境影响等问题。在当前环保要求日益严格、低碳发展需求迫切的背景下,对浓海水提溴工艺进行环境影响评价,并探寻低碳化转型路径,不仅关乎工艺自身的优化升级,更对海洋资源的高效利用与环境保护具有重要意义。

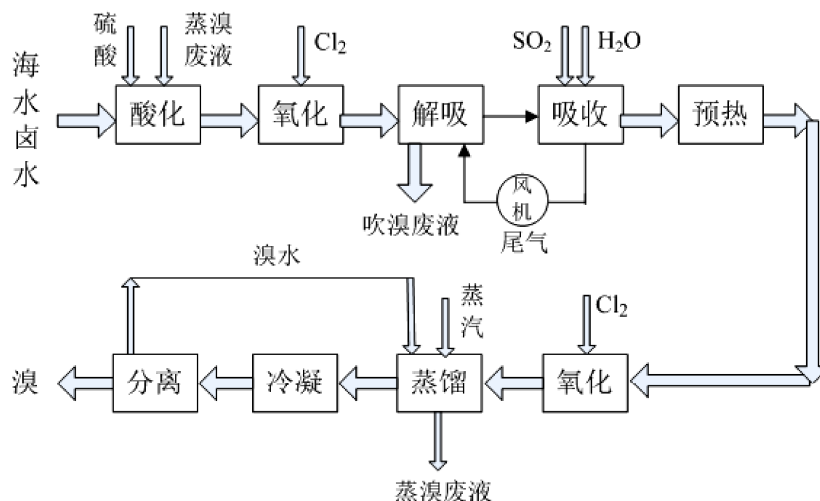
1 浓海水提溴工艺现状与关键技术

1.1 主流工艺流程解析

当前浓海水提溴主流工艺以空气吹出法为核心,广泛应用于海盐化工及海水淡化副产浓海水资源化利用场景。

其核心流程分为预处理、提溴反应、分离提纯三大环节:提溴反应环节向预处理后的浓海水中通入氯气作为氧化剂,将溴离子氧化为游离溴,再通入空气或水蒸气吹出溴蒸气;分离提纯阶段采用吸收塔用氢氧化钠溶液或二氧化硫水溶液吸收溴蒸气,经蒸馏得到工业级溴素,纯度可达99.5%以上^[1]。相较于海水提溴,浓海水提溴溴离子浓度提升1倍,大幅降低了处理量与能耗,但仍存在流程复杂、氧化剂消耗量大等问题,不同工艺在处理效率、能耗成本上的差异,使其适用于不同规模的生产场景。

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(浓)海水空气吹出法提溴过程中氧化工序关键技术及装备过程控制应用基础研究 K-JBYWF-202-KX06



酸法空气吹出海水卤水提溴工艺主要流程图

1.2 关键技术突破

1.2.1 高效节能提溴装置

高效节能提溴装置的研发与应用是浓海水提溴工艺

升级的核心突破点,重点解决传统装置传质效率低、能耗高的难题。新型高效填料塔替代传统板式塔,采用特种耐腐蚀填料,增大气液接触面积与接触时间,使溴蒸

气吹出效率可达90%。此外,余热回收型蒸馏装置的推广,将生产过程中产生的高温废水、溴蒸气余热回收用于预热原料蒸馏工序中完成液,可降低单位溴素生产能耗。针对浓海水强腐蚀性特点,研发的玻璃钢、氟塑料复合材质设备,不仅延长了设备使用寿命,还减少因设备腐蚀导致的停产损失与污染物泄漏风险,为大规模连续生产提供保障,推动提溴装置向高效化、节能化、大型化方向发展。

1.2.2 智能化控制系统

智能化控制系统的融入实现浓海水提溴工艺的精准调控与高效运维,打破了传统生产依赖人工经验的局限。该系统通过部署传感器实时采集浓海水流量、溴离子浓度、反应温度、pH值、溴蒸气纯度等关键参数,经工业物联网传输至中控平台,借助大数据分析与人智能算法优化工艺参数配比。当参数偏离设定范围时,系统可自动调节氧化剂用量、空气通入量、蒸馏温度等,确保反应稳定进行,提升溴素回收率与产品纯度,减少原料浪费。同时系统具备设备状态监测、故障预警与远程操控功能,可实时监测泵体、风机、蒸馏塔等核心设备的运行状态,提前预判设备磨损、泄漏等故障,减少非计划停机时间。智能化控制不仅使生产效率提升15%-20%,还降低人工成本与人为操作误差,实现从“经验化生产”向“精准化管控”的转变,为工艺优化提供数据支撑。

1.2.3 绿色氧化剂替代

绿色氧化剂替代技术有效破解了传统工艺中氯气氧化带来的环境风险与成本压力,是实现提溴工艺绿色化的关键。目前已研发的绿色氧化剂包括次氯酸钠复合氧化剂、臭氧氧化剂及生物氧化剂等:次氯酸钠复合氧化剂稳定性强、氧化效率高,可减少氯代副产物生成量80%以上,且储存运输便捷;臭氧氧化剂氧化选择性高,能快速将溴离子氧化为游离溴,无二次污染,但需优化臭氧发生设备降低能耗;生物氧化剂依托微生物代谢产生的氧化酶实现溴离子氧化,绿色环保且条件温和,适用于低浓度浓海水提溴场景。绿色氧化剂的应用不仅降低了环境风险,还拓宽原料适配范围,推动浓海水提溴工艺向绿色低碳方向转型。

2 浓海水提溴工艺的环境影响评价

2.1 大气环境影响

浓海水提溴工艺对大气环境的影响主要源于生产过程中排放的废气,在酸法工艺中,核心污染物包括未被吸收的溴蒸气、氯气、二氧化硫及少量挥发性有机物。溴蒸气具有刺激性气味,过量排放会刺激人体呼吸道黏

膜,长期暴露还可能对大气臭氧层造成轻微影响;若采用氯气作为氧化剂,过量氯气泄漏会形成刺激性有毒气体,对周边大气环境质量与人体健康构成威胁;部分工艺采用二氧化硫作为吸收剂,若吸收不完全导致泄漏,会引发酸雨,破坏周边植被与生态环境^[2]。另外,风机、泵体等设备运行过程中会产生噪声污染,间接影响周边居民生活质量。当前通过优化吸收工艺、加装废气处理装置、采用密封式设备等措施,可使溴蒸气、氯气等污染物排放浓度控制在国家标准以内,大幅降低对大气环境的影响,实现废气达标排放与资源化回收。

2.2 水环境影响

浓海水提溴工艺对水环境的影响体现在生产废水排放与海水生态扰动两方面。生产废水主要包括反应后的尾液及设备清洗废水,其中尾液含有未反应的溴离子、过量氧化剂、酸化剂及少量重金属离子,若直接排放会改变受纳水体的盐度、pH值与水质成分,影响水生生物的生存环境,导致浮游生物数量减少、鱼虾类生长受抑制。尾液中残留的氧化剂可能氧化水体中的有机物,产生有毒副产物,破坏水体生态平衡。通过构建废水循环处理系统,将尾液经中和、吸附、膜分离处理后,部分回用于预处理阶段,剩余达标尾液排放,可有效降低盐度、污染物对水环境的影响,同时减少水资源消耗,实现废水资源化利用。

2.3 土壤与生态影响

浓海水提溴工艺对土壤与生态的影响主要源于废水排放、固体废物堆放及设备泄漏等间接因素。若处理后的尾液未达标排放至近岸土壤或农田,高盐度废水会导致土壤盐碱化,破坏土壤结构,降低土壤透气性与肥力,影响农作物生长,甚至导致植被枯萎死亡。生产过程中若发生设备泄漏,浓海水、氧化剂等物质泄漏至周边土壤与植被区域,会灼伤植被、破坏土壤微生物群落,导致局部生态系统受损。通过规范固体废物堆放与处置、优化废水排放路径、加强设备密封防护等措施,可有效控制土壤污染风险,同时对受影响土壤采取盐碱改良、生物修复等技术,恢复土壤生态功能,降低对周边生态系统的破坏。

3 浓海水提溴工艺低碳化转型路径

3.1 工艺优化与技术创新

工艺优化与技术创新是浓海水提溴工艺低碳化转型的核心路径,通过简化流程、提升效率、减少污染物排放实现碳减排。整合预处理与提溴反应环节,采用一体化设备减少中间输送过程的能耗与物料损耗,同时优化氧化剂与吸收剂配比,降低原料消耗,减少副产物生

成。加大新型低碳提溴技术研发力度，如膜分离提溴技术、光催化氧化提溴技术等，大幅降低能耗与污染排放；光催化氧化技术利用新型光催化剂，在可见光照射下将溴离子氧化为游离溴，反应条件温和，无二次污染。通过耦合提溴与海水淡化、盐化工等产业，实现工艺协同优化，将提溴尾液用于制盐、提取镁盐等，提升资源利用率，减少碳足迹，推动工艺向低碳化、高效化、资源化方向升级^[3]。

3.2 能源结构调整

能源结构调整是降低浓海水提溴工艺碳排放的关键举措，核心是推广清洁能源与可再生能源应用。通过逐步采用太阳能、风能、潮汐能等可再生能源，大幅降低工艺碳排放量。例如，在沿海提溴企业推广太阳能光伏发电系统，为预处理、风机、泵体等设备供电；利用沿海地区丰富的风能资源，配套风力发电项目，满足蒸馏等高温工序的能源需求；结合潮汐能发电，实现能源供给的多元化。优化能源利用效率，采用高效节能设备、余热回收系统，提升能源利用效率，减少能源浪费。探索绿电与提溴工艺的深度融合，通过签订绿电采购协议、自建可再生能源发电设施等方式，逐步实现能源供给零碳化，为工艺低碳化转型提供能源支撑。

3.3 循环经济模式构建

构建循环经济模式是浓海水提溴工艺实现低碳转型与可持续发展的重要路径，核心是实现资源循环利用、污染物减量排放。在企业内部，构建“浓海水-溴素-尾液-副产物”的循环体系，提溴尾液经处理后用于制盐、提取硫酸镁、氯化钾等副产物，实现盐、溴、镁等资源的梯级利用，减少废水排放；固体废物经回收再生、无害化处理后，重新用于生产或转化为建材原料，提升固废资源化利用率。在产业层面，推动提溴产业与海水淡化、氯碱化工、养殖等产业协同发展，海水淡化副产浓海水作为提溴原料，提溴尾液供给盐化工企业，氯碱化工产生的氯气、氢氧化钠可作为提溴工艺的原料，形成跨产业循环链，实现资源共享、能耗互抵。

3.4 智能化与数字化升级

智能化与数字化升级为浓海水提溴工艺低碳化转型提供技术支撑，通过精准管控、高效运维实现能耗与碳排放的精细化管理。依托工业互联网、大数据、人工智能等技术，构建全流程数字化管控平台，实时采集生产过程中的能耗、物耗、污染物排放等数据，建立碳排放核算模型，精准核算各环节碳排放量，识别碳排放热点与节能潜力点。通过算法优化工艺参数，实现生产过程

的动态调控，在保证产品质量的前提下，最小化能耗与碳排放^[4]。借助数字孪生技术构建提溴工艺虚拟模型，模拟不同工艺参数、能源供给方式下的生产状态与碳排放情况，为工艺优化、节能改造提供数据支撑。通过智能化设备实现无人化运维，减少人工干预，提升生产效率，降低因人为操作失误导致的能耗浪费与污染物排放，推动工艺从“被动减排”向“主动控碳”转变，助力低碳化转型目标实现。

3.5 政策支持与标准引领

政策支持与标准引领是推动浓海水提溴工艺低碳化转型的重要保障。例如，对采用清洁能源、智能化设备的企业给予一定比例的资金补贴，对低碳提溴工艺研发项目提供税收减免。同时，制定严格的行业标准和规范，明确提溴工艺的碳排放限值、污染物排放标准等，引导企业规范生产，推动行业整体低碳化发展。建立碳交易市场机制，将浓海水提溴工艺纳入碳排放交易体系，促使企业主动减排，通过碳交易获取经济收益。加强政策宣传与培训，提高企业对低碳转型重要性的认识，增强企业主动转型的积极性和能力，形成企业主体、市场驱动的良好转型氛围，加速浓海水提溴工艺低碳化转型进程。

结束语

浓海水提溴工艺在资源利用上潜力巨大，但环境影响与碳排放问题不容忽视。通过环境影响评价明确了各环节对大气、水、土壤生态及固体废物等方面的影响，为针对性治理提供方向。低碳化转型路径的探索，从工艺、能源、模式、技术等多维度发力，为工艺绿色发展指明道路。未来，需持续创新，推动各项措施落地，实现浓海水提溴工艺经济效益与环境效益的统一，助力海洋经济可持续发展。

参考文献

- [1]杨德响,赵阳国,胡钰博,等.海水基质成分对紫外线去除游离氯和游离溴的影响[J].环境化学,2023,42(9):3051-3060.
- [2]彭赛军,李燕.海水淡化浓盐水溴盐镁钾联产工艺[J].中国井矿盐, 2025, 56(6): 1-2,6.
- [3]张心禄,张科平,李树林,等.海水淡化与制盐及提溴生产间的矛盾平衡研究[J].盐科学与化工,2024,53(11):48-50,54.
- [4]裴洪昌,岳茂文,刘建路,等.海水综合开发与高效利用研究进展[J].无机盐工业,2024,56(2):21-29.