

智能化控制技术在浓海水提溴工艺中的应用现状与挑战

王泽江¹ 张腾飞² 刘忠忱³ 李 腾⁴ 边晓阳⁵ 郭永维⁶

1. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所 天津 300192

2. 恒力石化(大连)炼化有限公司 辽宁 大连 116318

3. 恒力石化(大连)炼化有限公司 辽宁 大连 116318

4. 恒力石化(大连)炼化有限公司 辽宁 大连 116318

5. 恒力石化(大连)炼化有限公司 辽宁 大连 116318

6. 恒力石化(大连)炼化有限公司 辽宁 大连 116318

摘要: 本文聚焦智能化控制技术在浓海水提溴工艺中的应用。阐述了提溴核心工艺原理与智能化控制核心技术体系,分析其在氧化、吹出、吸收、蒸馏等环节的应用现状、系统组成功能及应用效果。同时指出面临传感器精度与可靠性、控制算法适应性、维护升级成本等挑战。最后从技术创新、经济优化、环境适应三方面提出应对策略,为推动浓海水提溴智能化发展提供参考。

关键词: 浓海水提溴; 智能化控制; 工艺优化

引言: 溴作为重要化工原料,在诸多领域应用广泛。浓海水提溴以海水淡化副产浓海水为原料,具有资源丰富、能耗低等优势。随着科技发展,智能化控制技术逐渐应用于该工艺,其在提升效率、质量,降低成本等方面潜力巨大,但实际应用中仍面临诸多问题。深入探讨智能化控制技术在浓海水提溴工艺中的应用现状与挑战,并提出应对策略,对推动该产业智能化升级具有重要意义。

1 浓海水提溴工艺基础与智能化控制核心技术

1.1 浓海水提溴核心工艺原理与流程

浓海水提溴以海水淡化副产浓海水为原料,依托溴离子的氧化-吹出-吸收-蒸馏分离原理实现提溴。其核心流程分为四步:首先对浓海水进行酸化预处理;

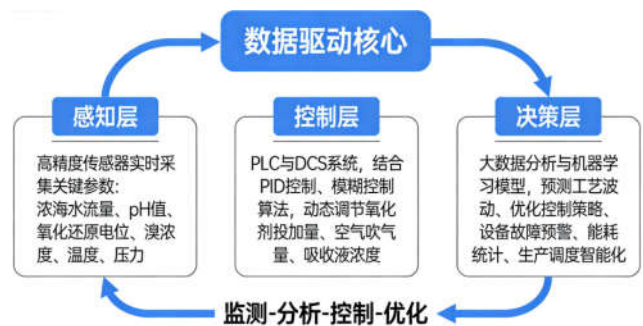
中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(浓)海水空气吹出法提溴过程中氧化工序关键技术与装备过程控制应用基础研究 K-JBYWF-202-KX06

随后向预处理液中加入氯气等氧化剂,将溴离子氧化为游离溴单质;接着通过空气吹出法,利用溴单质易挥发特性,用空气将其从水溶液中吹离,形成含溴空气混合物;最后经吸收液吸附富集溴元素,再通过蒸馏提纯得到高纯度溴产品^[1]。该工艺具有原料资源丰富、能耗低于传统海水提溴的优势,适配海水淡化产业协同发展需求,是实现溴资源高效利用的主流路径之一。

1.2 智能化控制核心技术体系

浓海水提溴智能化控制核心技术体系以数据驱动为核心,涵盖感知层、控制层与决策层三大模块。感知层

通过高精度传感器实时采集各环节关键参数,包括浓海水流量、pH值、氧化还原电位、溴浓度、温度及压力等,实现工艺状态全面监测;控制层基于PLC(可编程逻辑控制器)与DCS(分布式控制系统),结合PID控制、模糊控制等算法,对氧化剂投加量、空气吹气量、吸收液浓度等关键操作变量进行动态调节;决策层依托大数据分析机器学习模型,挖掘参数间关联规律,预测工艺波动趋势,优化控制策略,同时实现设备故障预警、能耗统计与生产调度智能化。三者协同运作,打破传统人工操作的滞后性与主观性,构建起“监测-分析-控制-优化”的闭环技术体系。



浓海水提溴智能化控制核心技术体系的示意图

2 智能化控制技术在浓海水提溴工艺中的应用现状

2.1 智能化控制技术在各环节的应用

2.1.1 氧化环节

氧化环节作为提溴工艺的关键前置步骤,智能化控制技术已实现精准调控与高效适配。目前主流应用基于

氧化还原电位（ORP）闭环控制体系，通过高精度ORP传感器实时监测反应液电位值，结合溴离子浓度在线检测数据，由PLC系统自动计算氧化剂及酸的最优投加量，避免氯气过量导致的浪费或投加不足造成的溴离子残留收率不足。部分企业引入模糊PID控制算法，解决氧化反应中pH值、温度交叉干扰问题，动态修正投加参数，使溴离子氧化率稳定在90%以上。同时，智能化系统可记录不同原料组分下的氧化参数组合，形成数据库，通过机器学习优化控制逻辑，适配浓海水溴离子浓度波动场景，较传统人工投加方式有效降低氧化剂消耗。

2.1.2 吹出环节

吹出环节智能化控制聚焦于提升溴单质分离效率，核心围绕喷淋密度、气液比两大参数调控。通过气体流量计与液体流量计实时采集数据，智能化系统自动调节风机转速与浓海水输送泵频率，维持最优气液比^[2]。部分智能化系统还引入在线吹废溴离子检测仪，实时监测吹出后溶液中溴残留量，反向调节操作参数，使溴吹出率提升至85%以上，较传统工艺减少5%-8%的溴损失。

2.1.3 吸收环节

吸收环节智能化控制以提升溴富集效率、稳定吸收液性能为核心目标，广泛应用自适应调节与反馈控制技术。该环节通过在线监测吸收液浓度、pH值及吸收塔进出口含溴空气浓度，由智能化系统自动调节吸收液喷淋量与循环速率，确保吸收液与含溴空气充分接触。针对吸收过程中吸收液活性衰减问题，系统可通过浓度检测数据预判衰减趋势，自动补充新鲜吸收液，维持吸收效率稳定。同时，采用分布式控制架构，对吸收塔不同区域压降进行分区调控，避免局部浓度过高导致的结晶堵塞。应用智能化控制后，吸收环节溴富集浓度波动幅度控制在±5%以内，降低后续蒸馏环节能耗。

2.1.4 蒸馏环节

蒸馏环节作为提溴工艺的提纯关键环节，智能化控制技术重点解决温度精准控制与能耗优化问题。通过智能温度传感器实时监测蒸馏塔关键部位温度，结合溴化物沸点特性，由控制系统自动调节加热功率与蒸汽或氯气供应量，将塔顶温度稳定在溴单质沸点区间，避免温度过高导致杂质挥发或温度不足造成的提纯不彻底。同时引入能耗优化模型，基于蒸馏负荷、原料浓度等数据，动态调整水蒸气用量，在保障产品纯度的前提下最小化能耗。部分高端系统还集成在线纯度检测仪，实时反馈产品纯度数据，反向修正蒸馏参数，使溴产品纯度稳定在99.5%以上，较传统人工调控减少10%的蒸汽消耗，降低生产成本。

2.2 智能化控制系统的组成与功能

浓海水提溴智能化控制系统由硬件与软件两部分组成，形成全方位功能覆盖。硬件部分核心包括高精度传感器（ORP、浓度、温度、压力传感器等）、PLC控制器、DCS分布式控制终端、执行机构（调节阀、泵、风机等）及数据采集模块，负责工艺参数采集、控制指令执行与设备联动；软件部分涵盖数据处理系统、控制算法模块、机器学习平台、故障预警系统及可视化监控界面。系统核心功能分为四大类：一是实时监测功能，对全流程参数进行24小时不间断采集与可视化展示，支持参数异常报警；二是精准控制功能，通过多种控制算法实现各环节操作变量动态调节，保障工艺稳定性；三是优化决策功能，依托大数据与机器学习优化控制策略，实现能耗、效率与质量的平衡；四是运维管理功能，记录生产数据、分析设备运行状态，实现故障预警、维护提醒与生产报表自动生成，为生产管理提供数据支撑。

2.3 应用效果分析

智能化控制技术在浓海水提溴工艺中的应用已取得显著成效，从效率、质量、成本三方面实现产业升级。效率层面，自动化调控替代人工操作，减少参数调节滞后性，有效降低能耗，提高收率和设备运行稳定性，同时降低人工劳动强度，减少人为操作失误。质量层面，精准的参数控制使溴产品纯度稳定在99.5%以上，纯度波动幅度控制在±0.3%以内，远优于传统工艺±1%的波动范围，产品合格率提升至99.8%。成本层面，通过优化氧化剂、蒸汽等耗材用量及设备能耗，单位溴产品生产成本降低5%-10%，同时智能化故障预警减少设备停机时间，设备使用寿命延长3-5年，进一步降低运维成本。另外，智能化控制实现生产过程可追溯，满足环保与行业监管要求，推动提溴产业向绿色化、标准化转型。

3 智能化控制技术在浓海水提溴工艺中面临的挑战

3.1 传感器精度与可靠性问题

传感器是智能化控制的“感知器官”，其精度与可靠性不足是核心瓶颈。浓海水成分复杂，含高浓度盐离子等，长期使用会使传感器探头结垢、腐蚀，降低精度甚至故障。如ORP等传感器易被污染及氧化损坏，检测数据偏差超±10%，影响指令准确性。且提溴工艺工况极端，普通传感器难适应，寿命短至3-6个月，频繁更换增加成本、中断数据采集。高端传感器依赖进口，国产传感器有差距，进一步制约智能化控制^[3]。

3.2 控制算法的适应性与优化问题

控制算法适应性与优化能力不足，难匹配提溴工艺复杂波动特性。原料组分受多种因素影响，溴离子等波

动频繁,传统PID算法在非线性等工况下,易出现调节超调、响应滞后问题。现有机器学习模型对突发工况自适应差,难快速调整策略。另外,不同企业工艺、设备有差异,通用算法适配性差,定制化算法开发成本高、周期长,制约智能化控制规模化推广。

3.3 维护与升级成本问题

高维护与升级成本是中小提溴企业应用智能化控制的主要障碍。维护上,系统硬件复杂,需专业人员定期维护,国内运维人员稀缺,单次维修成本达数万元。软件需定期更新优化,年费用占系统总投入15% - 20%。升级方面,传统企业智能化改造需对原有设备改造或更换,初期投入高,单条生产线改造费用达数百万元。中小企业利润有限,难以承受,导致智能化技术应用普及率低。

4 应对挑战的策略与建议

4.1 技术创新策略

针对技术层面的瓶颈,需通过多维度技术创新突破制约。传感器方面,加大国产化研发投入,开发适配浓海水腐蚀、结垢工况的专用传感器,采用抗腐蚀涂层、自清洁探头等技术,提升传感器精度与使用寿命,同时研发低成本校准设备,降低校准难度与成本。控制算法方面,融合模糊控制、神经网络与PID控制技术,开发自适应强、抗干扰能力强的复合控制算法,结合实际生产数据持续训练模型,提升算法对工况波动与突发情况的响应能力。推动产学研协同创新,联合高校、科研机构与企业开发通用型与定制化结合的控制系统,优化系统架构,提升硬件与软件的兼容性,降低定制化开发成本,同时探索数字孪生技术在提溴工艺中的应用,实现工艺全流程虚拟仿真与优化。

4.2 经济优化策略

围绕成本问题,需从投入、运维、产业链协同三方面制定经济优化策略。投入端,鼓励企业采用“分步改造”模式,优先对氧化、蒸馏等关键环节进行智能化升级,逐步实现全流程智能化,降低初期投入压力;同时,政府可出台专项补贴、税收减免政策,支持企业智能化改造与国产设备替代。运维端,构建专业化运维服务体系,培育第三方运维团队,为企业提供上门校准、检修、技术支持等服务,降低企业自主运维成本;通过

数字化管理优化维护计划,基于设备运行数据预判故障,实现预防性维护,减少非计划停机损失^[4]。产业链协同端,推动提溴企业与海水淡化企业、传感器制造商深度合作,实现原料、技术、资源共享,规模化应用降低设备与技术采购成本。

4.3 环境适应策略

为提升智能化控制系统对浓海水提溴复杂工况的适应性,需从工况适配、设备防护、应急调控三方面发力。工况适配方面,在系统设计阶段充分调研不同海域浓海水组分、气候条件对工艺的影响,开发具备工况识别功能的控制系统,自动切换控制参数。设备防护方面,对传感器、执行机构等关键硬件进行针对性防护改造,采用耐腐蚀、抗结垢材料,配套安装在线清洗装置,定期清除探头表面杂质,保障设备稳定运行;优化设备布局,避免极端温度、压力环境对设备的影响。应急调控方面,完善系统应急响应机制,预设原料波动、设备故障等突发工况的应对方案,一旦检测到异常,自动启动备用控制策略,快速调整参数,减少工艺波动与损失,提升系统整体抗风险能力。

结束语

智能化控制技术在浓海水提溴工艺中的应用虽取得一定成效,提升了效率、质量,降低成本,但传感器、控制算法、维护升级成本等问题仍制约其进一步发展。通过技术创新、经济优化、环境适应等策略,有望突破瓶颈,提升系统性能与稳定性,降低应用成本。未来,随着技术不断进步,智能化控制技术将在浓海水提溴产业中发挥更大作用,推动产业向绿色、高效、智能化方向持续迈进。

参考文献

- [1]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.
- [2]柴澍靖,张文燕,郝晓翠,等.大数据时代背景下的海水提溴发展展望[J].应用化工,2023,52(6):1813-1815,1822.
- [3]陈倩群,魏春荣.基于生产情境构建工艺流程模型的“海水提溴”教学[J].中学化学教学参考,2024(26):58-61.
- [4]李燕,彭赛军.海水淡化浓盐水联产烧碱、纯碱工艺[J].盐科学与化工,2022,51(12):7-10,27.