

钢铁工业高盐废水处理技术进展

包 娜¹ 梁旻昊²

1. 中冶建筑研究总院有限公司（钢铁工业环境保护全国重点实验室） 北京 100088

2. 北京城市排水集团有限责任公司 北京 100044

摘 要：钢铁工业高盐废水成分复杂、处置难度大，不合理处理会制约行业绿色发展。现有水处理工艺存在结垢严重、浓缩效率低、盐品利用率差等诸多问题。本文系统梳理高盐废水主流处理工艺，逐层剖析预处理、膜法浓缩、热法浓缩、分质结晶四大核心技术体系的工艺原理与优化路径，明确各单元技术的改良思路与应用优势，构建完整的高盐废水减量与资源化处理体系，能够为钢铁行业高盐废水无害化、资源化处置提供技术参考。

关键词：钢铁工业；高盐废水；预处理；浓缩技术；分质结晶；资源回收

引言：钢铁生产全流程会产生大量高盐废水，水体富集硬质离子、悬浮胶体与多种溶解性污染物，复杂水质条件对水处理设备与工艺运行提出严苛要求。传统处置模式多侧重水体减量化，忽略盐类资源再生利用，整体处理体系存在明显短板。依托差异化工艺技术完成水质净化、废水浓缩与盐品回收，逐步优化各处理单元的运行架构与工艺逻辑，可有效提升废水处理效能，推动钢铁工业废水处理体系向绿色资源化方向升级。

1 钢铁工业高盐废水预处理技术路径

1.1 前端硬度脱除工艺单元

钢铁高盐废水体系内普遍存在高浓度钙、镁离子，是诱发设备结垢的主要诱因。水体浓缩升温过程中，游离的钙镁离子会和水体中的碳酸根、硫酸根结合，生成质地坚硬、附着力强的盐类垢层，附着于换热管壁、膜面通道与各类管路内壁。前端硬度脱除工艺单元依托成熟的物化反应机制，调整水体酸碱环境与反应工况，推动游离硬质离子发生理化转化。可溶性离子逐步转化为稳定的固态沉淀物，依托固液分离设备完成彻底截留去除。有效降低水体硬度水平，从源头遏制结垢问题的产生，减少设备损耗，延长深度处理设备的服役周期^[1]。

1.2 溶解性有害离子定向分离流程

钢铁冶炼及深加工流程会向废水体系带入多种微量溶解性有害离子。常规物理过滤手段仅能拦截固态杂质，无法作用于溶解态存在的离子污染物。这类杂质长期留存水体内部，会缓慢腐蚀金属材质的设备构件。进入结晶工序后，还会混杂在盐类晶体中，拉低结晶盐的纯净度与利用价值。溶解性有害离子定向分离流程结合各类污染离子的理化属性差异，选用适配的沉淀转化、

离子置换工艺。精准改变有害离子的溶解形态，将分散于水体中的微量杂质转化为固态可分离物质。全面净化水体组分，优化水质基底，为后端盐类资源化回收筑牢品质基础。

1.3 悬浮物与胶体杂质前置拦截体系

钢铁废水中包含大量微细工业粉尘、金属氧化物微粒以及亲水胶体物质。这类杂质粒径细微，在水体中分散均匀，具备极强的稳定性，自然沉降难度较高。长期滞留水体内部会持续淤积在膜孔、换热缝隙等精细结构中，缩小流体流通截面，增加水处理系统运行能耗。悬浮物与胶体杂质前置拦截体系整合凝聚、絮凝、分级过滤多种工艺方式，打破胶体颗粒的稳定分散结构。细微颗粒相互吸附团聚，形成大体积絮体结构。通过沉降、过滤多级处理实现彻底去除，降低水体浊度，削减固态杂质对深度处理单元的负面影响。

1.4 预处理阶段水质稳定调控方法

钢铁生产线运行负荷的动态变化，会造成外排废水酸碱度、离子组分、水体温度出现大幅波动。不稳定的进水状态会打乱各预处理单元的反应节奏，造成杂质去除效果波动起伏。预处理阶段水质稳定调控方法针对水体核心运行参数开展精细化调控，平衡水体酸碱状态，规整紊乱的离子组分。削弱生产工况变动带来的水质偏差，让预处理出水维持统一稳定的状态。标准化的进水条件适配各类深度处理工艺的运行要求，为高盐废水全流程、资源化、稳定化处理提供坚实保障。

2 膜法高盐废水浓缩处理技术体系

2.1 抗污染耐高压膜组件适配设计

钢铁高盐废水盐分浓度高、杂质组分复杂，常规膜

组件难以适配高压、高盐的严苛运行环境,极易出现膜面破损、污染堵塞、性能衰减等问题。抗污染耐高压膜组件设计聚焦钢铁废水处理的专属工况需求,优化膜体基材结构与表面特性。通过改良膜材料配方,强化膜体的结构强度与抗压性能,适配高盐浓缩过程中的高压运行环境^[2]。针对性调整膜孔分布与表面粗糙度,提升膜面的抗附着能力,削弱盐类晶体、微量污染物在膜面的堆积能力,让膜组件可以长期适配钢铁高盐废水的连续化处理工况。

2.2 膜面极化效应抑制技术路线

膜法浓缩作业过程中,水分持续透过膜体完成分离,盐类物质会在膜面表层不断积聚堆积,形成浓度差异显著的边界层。浓度极化现象会大幅提升渗透阻力,削弱水分透过效率,还会抬高膜面局部盐浓度,加速盐类结晶析出,诱发不可逆的膜面结垢污染。极化问题是制约膜法高盐废水长效运行的核心因素。现有技术路线通过重构水体流动状态、优化运行参数体系、调整冲刷模式等多种方式改善膜面水环境。打破膜面盐分层富集的静态状态,强化水体对膜表层的动态冲刷作用,打散高盐浓度边界层。均衡膜面整体盐分分布,弱化浓度极化带来的渗透阻力上升与结垢隐患,保障膜分离过程平稳有序推进。

2.3 高盐工况下膜通量动态维持机制

膜通量是衡量膜法浓缩处理效率的核心指标,高盐环境、杂质附着、工况波动都会造成膜通量持续衰减,降低废水浓缩处理效率。膜通量动态维持机制立足高盐废水处理全运行周期,结合水质变化与设备运行状态,建立动态调控逻辑。依据水体盐分浓度、运行时长、膜面污染程度等工况变化,合理调整运行压力、水流流速与处理负荷。精准适配不同阶段的处理需求,延缓膜性能衰减速度,让膜通量始终维持在相对稳定的区间,保障浓缩系统持续稳定产出,提升高盐废水减量化处理的连续性。

2.4 膜段酸碱交替清洗操作流程

长期运行的膜处理系统,膜面会累积无机盐垢、有机污染物、胶体杂质等多层附着物,单一清洗方式无法彻底清除各类污染沉积物。酸碱交替清洗操作流程针对不同类型污染物的理化特性,划分分段清洗作业模式。酸性清洗介质可溶解膜面附着的无机盐硬质垢层,瓦解盐类结晶堆积结构。碱性清洗介质能够剥离膜面吸附的有机杂质与胶体污染层。规范有序的交替清洗流程可逐层清除膜面各类污染物,修复膜组件渗透性能,恢复膜

系统初始运行状态,延长膜组件使用寿命,保障膜法浓缩体系长期稳定运行。

3 热法高盐废水深度浓缩处理技术架构

3.1 多效蒸发工艺流道优化设计

多效蒸发依托多级蒸发单元的热能梯级利用模式,实现废水连续浓缩处理,是钢铁行业高盐废水减量处理的主流工艺。传统流道布局设计较为粗放,流体在管路与换热单元内分布不均。换热版面利用程度不足,局部流通死角会持续积聚盐类微粒与污垢杂质。长期运行工况下,有效换热面积不断缩减,蒸发处理效能逐步下滑。流道优化设计重新统筹废水进料、流体输送与蒸汽换热的整体路径,细化各级蒸发单元的流体分配结构与管路截面参数。全新的布局模式可以改善流体在换热界面的流动状态,消除滞留死角,让水体均匀覆盖全部换热区域^[3]。稳步提升热能利用水平,减少盐垢局部沉积概率,维持多效蒸发单元长效运行的换热性能。

3.2 机械蒸汽再压缩工况适配调控

机械蒸汽再压缩工艺通过机械装置提升二次蒸汽热值,回收相变过程产生的余热,大幅降低外源热能消耗,具备突出的节能运行优势。钢铁生产线负荷波动会改变进水盐分浓度与水体流量参数,蒸发环节产出的蒸汽热值、气量都会产生浮动。固定参数运行模式无法适配动态水质变化,容易造成热能回收不充分、设备负荷偏移等问题。工况适配调控围绕蒸汽压缩、热能回用、物料蒸发全过程开展精细化参数调校,结合进水状态与浓缩进程调整压缩频率、换热负荷等核心参数。精准适配不同浓缩阶段的热能供需关系,稳定蒸汽输出热值,提升余热利用效率,弱化水质波动对蒸发系统运行状态的干扰。

3.3 降膜蒸发最小润湿流量控制逻辑

降膜蒸发的核心运行优势依托换热管壁均匀铺展的薄液膜实现高效换热汽化,液膜成型状态直接左右蒸发效率与设备运行稳定性。流量参数设置偏低,换热管壁无法形成完整水膜,裸露管壁会出现干烧过热现象,加速盐类晶体固化板结,诱发大面积结垢问题。流量参数设置偏高会增加流体输送能耗,弱化相变分离的工艺效果。最小润湿流量控制逻辑结合换热管结构尺寸、壁面材质特性与废水理化属性,界定适配降膜蒸发运行的基础流量区间。通过精细化流量调控,维持管壁液膜均匀、完整铺展,规避干壁过热带来的设备损伤与结垢隐患。稳定的液膜结构可以充分释放降膜蒸发的换热优势,维持蒸发工序高效运转。

3.4 强制循环蒸发系统阻力匹配方案

强制循环蒸发工艺适配高盐、易结垢的严苛浓缩场景,依靠循环动力驱动水体高速流动,利用流体冲刷作用抑制盐类晶体附着管壁。整套系统涵盖多级管路、换热组件与动力设备,流体流动过程会产生梯度化流通阻力。系统内部阻力配比失衡,会引发流体滞流、循环负荷异常、蒸发工况紊乱等问题。阻力匹配方案全面梳理流体流通路径的阻力构成,优化管路布局、管件规格与动力设备运行参数。平衡系统各段流通阻力差值,让水体循环流速匹配蒸发工艺的运行要求。合理的阻力配比可以削减无效能耗损耗,强化流体壁面冲刷效果,抑制盐垢堆积滋生,保障强制循环蒸发系统持续完成高盐废水深度浓缩作业。

4 高盐废水分质结晶与资源回收技术方向

4.1 钾钠组分定向分离工艺设计

钢铁高盐废水浓缩母液中,钠盐与钾盐占据盐分主体结构,两类组分具备较高的资源化利用价值。两种盐类的溶解能力随温度、浓度的变化表现出不同变化规律,结晶窗口存在交叉重叠的特点。常规结晶工艺难以实现两类盐分的有效拆分,析出产物多为混杂混盐,丧失单独回用的价值。钾钠组分定向分离工艺围绕盐类结晶动力学规律优化整体工艺框架,依托梯度浓缩、温度分区控制、阶段性析晶的设计思路,重塑母液结晶反应环境^[4]。精准调控溶液过饱和程度与温度变化节奏,构建适配单一盐组分优先成核、稳定生长的反应条件。通过阶段式工况调整,完成两类盐分的错峰析出与单独收集,有效规避混晶共生问题,提升单盐产物纯度,为结晶盐工业化回用提供工艺支撑。

4.2 重金属同步脱除技术路径

高盐母液经过深度浓缩后,水体盐度处于极高水平,微量重金属杂质均匀分散在水体内部。高盐环境会弱化常规净化工艺的处理效果,残留重金属杂质会在晶体生长过程中包裹于晶格内部,造成盐品品质下降,限制后续利用渠道。重金属脱除技术路径布置于结晶工序前端,适配高盐水体的特殊运行环境。通过微调水体酸碱状态,投加针对性功能药剂,促使游离态重金属离子发生物化转化,生成稳定的固相沉积物。借助高效固液分离设备完成固相杂质的彻底剥离,降低母液内部重金属富集程度。有效解决高盐体系下重金属难以去除的技术难题,保障后续结晶产物的纯净度。

4.3 结晶盐品质调控操作流程

结晶盐的晶粒形态、粒径分布与整体纯度,决定资源化产物的利用价值与应用范围。结晶过程中的温度波动、过饱和状态维持时长、晶体生长速率,都会对盐品成型质量产生直接影响。结晶盐品质调控操作流程细化全流程作业规范,对结晶阶段各项运行参数实施精细化管理。合理规划升温、恒温、降温的梯度节奏,维持稳定的溶液过饱和状态,规避瞬时大量成核引发的晶粒细碎化问题。平稳的反应环境可以支撑晶粒有序生长,培育结构规整、粒径均匀的结晶产物。减少杂质包裹、晶格缺陷等问题,稳定结晶盐产出品质,提升废水资源化处理的经济效益。

4.4 母液闭环循环处理衔接机制

高盐母液完成结晶析盐作业后,剩余残液依旧留存部分未析出盐分与各类浓缩杂质。直接外排残液会造成盐资源损耗,也会带来潜在的环境隐患。母液闭环循环处理衔接机制优化各工艺单元的衔接逻辑,打通结晶末端与前端浓缩单元的输送链路。结晶残液可回流至热法浓缩系统,重新参与水体增浓与盐分富集流程。残留盐分能够再次进入结晶体系完成析出回收,难降解杂质可在系统内部富集后集中无害化处置^[5]。完整的循环链路可以提升盐资源回收利用率,消除母液外排风险,健全高盐废水零排放与资源化的完整工艺体系。

结束语

钢铁工业高盐废水处理依靠多单元工艺协同配合,形成从水质预处理、废水深度浓缩到盐资源回收的完整技术链条。各类工艺技术通过结构优化、参数调控与链路完善,有效解决设备结垢、处理效率不足、盐品品质较差等实际问题。多技术融合的处理模式,大幅提升废水减量化与资源化水平,助力钢铁行业实现清洁生产,为工业高盐废水精细化处置提供成熟的技术借鉴。

参考文献

- [1] 杨本涛,冯哲愚,叶恒棣,等.钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比[J].烧结球团,2022,47(4):77-82.
- [2] 杨蕊,宋江锋,周瑞莎.高碱度钢铁工业废水降硬工艺优化[J].精细化工中间体,2026,56(1):68-76.
- [3] 张志宝.煤化工高盐废水处理工艺的研究及优化运行[J].清洗世界,2022,38(12):26-28.
- [4] 赵鹏飞,孙丽娜.零排放技术在化工废水处理中的应用[J].化工环保,2023,39(1):30-37.
- [5] 王磊,李娜.蒸发结晶技术在高盐废水处理中的应用分析[J].工业水处理,2020,40(10):78-84.