

# 含氟高TDS工业混合废水深度处理回用工艺包的优化研究

徐迎春<sup>1</sup> 杨武斌<sup>2</sup> 郭璇<sup>3</sup> 马强<sup>4</sup> 李雪梅<sup>5</sup>

1. 身份证号: 1330291980\*\*\*\*0011
2. 身份证号: 3600001975\*\*\*\*0533
3. 身份证号: 3707851987\*\*\*\*5204
4. 身份证号: 1402031984\*\*\*\*001X
5. 身份证号: 4290051985\*\*\*\*1827

**摘要:** 伴随工业规模不断扩大, 含氟高 TDS 废水的排放量也在增多, 其水质复杂且氟化物超出标准, 传统处理方式难以达到回用需求。本文依据工业混合废水的特性, 对深度处理回用工艺包展开优化设计并进行实验验证, 借助多级预处理、膜分离、化学沉淀、高级氧化相组合的方式, 达成氟和 TDS 的高效去除, 与此同时降低能耗、运行成本。结果表明, 优化工艺包的出水氟浓度低于 1mg/L, TDS 控制在 1200mg/L 以内, 水质符合工业回用标准, 可为高氟高盐废水的安全回用提供技术参考。

**关键词:** 含氟废水; 高 TDS; 深度处理; 回用工艺包; 膜分离; 化学沉淀

## Optimization Study on the Process Package for Deep Treatment and Reuse of Fluoride-Containing High TDS Industrial Mixed Wastewater

Xu Yingchun<sup>1</sup>, Yang Wubin<sup>2</sup>, Guo Xuan<sup>3</sup>, Ma Qiang<sup>4</sup>, Li Xuemei<sup>5</sup>

1. ID Card Number: 1330291980\*\*\*\*0011
2. ID Card Number: 3600001975\*\*\*\*0533
3. ID Card Number: 3707851987\*\*\*\*5204
4. ID Card Number: 1402031984\*\*\*\*001X
5. ID Card Number: 4290051985\*\*\*\*1827

**Abstract:** With the continuous expansion of industrial scale, the discharge of fluoride-containing high-TDS wastewater is also increasing. This wastewater has complex water quality and fluoride levels exceeding standards, making traditional treatment methods difficult to meet reuse requirements. This paper, based on the characteristics of industrial mixed wastewater, optimizes the advanced treatment and reuse process package and conducts experimental verification. By using a combination of multi-stage pretreatment, membrane separation, chemical precipitation, and advanced oxidation, high-efficiency removal of fluoride and TDS is achieved, while reducing energy consumption and operating costs. The results show that the optimized process package achieves an effluent fluoride concentration below 1 mg/L, TDS controlled within 1200 mg/L, and water quality that meets industrial reuse standards, providing a technical reference for the safe reuse of high-fluoride, high-salinity wastewater.

**Keywords:** Fluoride-containing wastewater; High TDS; Advanced treatment; Reuse process package; Membrane separation; Chemical precipitation

## 0 引言

近些年来, 冶金、电镀、化工等行业当中, 氟化物有着广泛的应用。然而随之出现的情况是, 含氟高 TDS 废水排放的问题变得越发突出。高浓度的氟离子、TDS, 不但对生态环境构成威胁, 而且也会对水资源的可持续利用产

生影响。传统的单一处理方式, 很难同时达成氟和 TDS 的高效去除, 并且还存在着膜污染、运行成本高等方面的问题。本文依据工业混合废水的特性, 在预处理、膜分离、化学沉淀、高级氧化等环节对工艺包加以优化, 并且经过实验进行验证, 从而为高氟高盐废水能够安全回用提供技术方

面的参考。

## 1 含氟高 TDS 工业混合废水特性分析

### 1.1 水质特性

含氟高 TDS 废水主要源自冶金、电解、化工等工业过程,其水质呈现出高氟、高盐、高碱性的特性,伴随着多种阴阳离子混合存在,而且 COD、BOD、部分重金属离子的浓度波动显著。废水在储存、输送还有混合的过程中容易形成沉淀和结晶物,从而影响后续处理单元的效率、稳定性。对典型工业混合废水样品展开分析,结果显示氟离子浓度能够达到 20 至 80 毫克每升, TDS 值高达 4000 至 8000 毫克每升,水中还含有钙、镁、硫酸盐、少量重金属,这表明水质处理难度较大。水中离子种类繁多、浓度高,单一处理工艺很难兼顾氟和 TDS 的协同去除,需要结合多级组合处理技术,达成废水深度净化、回用水质达标,同时确保工艺经济性、操作可控性,为工业废水综合治理提供技术依据。

### 1.2 水量与排放特性

氟含量高且 TDS 高的废水排放量直接受到工业生产节奏的作用,展现出明显的在时间与空间方面的波动特性,在高峰期和低峰期的时候,水量存在着显著的差异,水质也会因为生产工艺的改变而出现不稳定的情况。这样的波动给废水处理单元的设计、运行控制、药剂投加量都造成了较大的难题,这就需要工艺包拥有调节和缓冲的能力,以此来应对水量和水质变化所带来的影响。在线监测系统能够实时监测氟离子浓度、TDS、pH 值,并且把监测得到的数据反馈到控制系统之中,达成药剂投加和膜单元运行参数的动态调节,进而确保出水水质稳定且可靠。借助预留缓冲池、设置调节池、建立自动化调控机制,工艺包能够应对水量波动,提高系统运行的灵活性和安全性,为工业循环水回用提供稳定的保障。

### 1.3 污染物去除难点

含氟高 TDS 废水中氟离子处于高度溶解状态,传统化学沉淀方法在去除高浓度氟时效率不高,并且在高 TDS 环境下膜分离技术易受结垢、渗透压升高的影响,进而造成膜通量下降。水中混合阴阳离子的存在会对沉淀和离子交换过程产生进一步干扰,致使氟和盐难以同时达到工业回用标准。工艺优化的关键是借助多级组合处理来达成协同去除,也就是利用预处理减少悬浮物和污染物负荷,借助膜分离实现盐分和氟的高效截留,通过化学沉淀与高级氧化等辅助工艺去除残余氟及有机污染物。而且,通过对运行参数和药剂投加量进行优化,能够降低能耗、运营

成本,提高系统经济性与可持续性,达成高氟高 TDS 废水的深度处理、稳定回用。

表1 典型含氟高TDS工业废水水质指标

水质参数	浓度范围	备注
氟离子	20 - 80 mg/L	高氟废水特性
TDS	4000 - 8000 mg/L	高盐特性
pH	7.5 - 9.5	碱性水质
COD	50 - 200 mg/L	有机污染物

## 2 深度处理回用工艺包优化设计

### 2.1 多级预处理

对于含氟高 TDS 的工业废水特性,预处理环节运用絮凝沉淀、pH 调节、微滤组合技术,达成对大颗粒悬浮物、部分重金属的高效去除,给后续膜分离单元减轻污染负荷予以保障。pH 调节可促使氟离子形成  $\text{CaF}_2$  结晶,提高沉淀效率,与此同时降低反渗透膜污染的可能性。微滤进一步除掉细小悬浮物和胶体,确保膜分离单元运行的稳定性、通量持续性。经过优化设计,多级预处理不但能够降低膜污染风险、延长膜寿命,还为氟和 TDS 的协同去除奠定基础。试验运行结果表明,该预处理系统在废水水量和水质波动状况下都能保持出水稳定,确保了工艺包整体效率,为工业废水深度处理回用提供了可靠的前处理技术支持。

### 2.2 膜分离处理

膜分离属于高 TDS 废水深度处理的关键环节,此工艺运用纳滤跟反渗透组合方式,以此兼顾氟离子去除、盐分控制。纳滤单元可截留大部分多价离子还有部分氟离子,大幅降低 RO 膜负荷,RO 膜则进一步去除残余 TDS 与氟,让出水水质符合工业回用标准。于工艺优化进程里,借助降低反渗透运行压力、合理把控回收率、施行周期性清洗方式,有效处理了膜结垢问题,延长膜使用寿命,还提高系统稳定性与经济性。运行结果显示,膜分离单元于处理高盐、高氟水质时维持稳定通量,出水水质波动幅度不大,确保后续化学沉淀、高级氧化处理单元高效运行,为深度处理工艺包提供了可靠的水质基础与操作可控性。

### 2.3 化学沉淀与高级氧化

对于高浓度氟、难降解有机物,工艺包把化学沉淀跟高级氧化技术结合起来,达成出水水质的优化。借助石灰-铝复合沉淀反应,能够有效去除残余氟还有部分重金属,降低水体毒性,与此同时改善水的物理化学性质,为高级氧化创造适宜条件。臭氧与过氧化氢联合氧化能够降解 COD、微量有机污染物,提高水质稳定性并满足回用

标准。实验结果表明,该联合处理工艺能让氟去除率超过95%,COD去除率达到85%以上,出水水质稳定可靠。化学沉淀与高级氧化环节的协同作用不但确保了废水深度净化效果,还为工艺包整体运行提供了安全性跟可持续性基础,为高氟高TDS废水的工业回用提供了高效可行的解决办法。

### 3 工艺运行优化与控制策略

#### 3.1 在线监控与调控

在高氟高TDS废水处理工艺里,实时在线监测pH值、氟离子浓度、总溶解固体、浊度非常关键,这对保证系统稳定运行意义重大。借助布设传感器并与PLC系统联动,能达成对药剂投加、膜单元冲洗周期、氧化剂投加量的自动化调控,如此工艺便可快速应对废水水质和水量的波动,保障出水水质持续稳定达到标准。监控数据能用来动态调整操作参数,提高工艺适应性,同时借助历史数据分析来优化运行策略,降低膜污染风险、化学药剂浪费。这种在线控制模式不但保证了膜分离单元和化学沉淀单元高效协同运行,还通过对关键指标的实时预警和反馈,提高整个系统的运行安全性和可靠性,为高浓度氟和高TDS废水的稳定回用给予了技术支撑。

#### 3.2 能耗与成本优化

在优化工艺运行之时,膜单元运行压力有所降低、反渗透回收率得到合理控制、药剂投加量实现精确调整,这些都是达成能耗与运营成本优化的关键点。实验与模拟得出的结果表明,把RO膜运行压力从2.0兆帕降至1.6兆帕,并且将回收率控制在大概65%,在确保出水氟和TDS指标达标的情形下,能耗能够降低约15%。借助优化药剂投加策略、复用沉淀残渣里的部分化学剂,能够进一步削减化学成本,达成整体运营费用的明显降低。此策略借助工艺参数的精细化管理,使得能源消耗、药剂使用、污泥产生量达成平衡,既保障了系统稳定性,又提高经济性,为大规模工业应用提供了可靠的参照。

#### 3.3 污泥与浓水处理

在高氟高TDS废水深度处理进程里,如果产生的污泥和浓水没有得到妥善处理,就有可能引发二次污染方面的问题。对于这个情况,运用浓水反渗透结晶技术并结合高温焚烧,能够有效回收浓水中的氟盐,沉淀污泥经过脱水操作后,其中的氟盐可以当作工业原料再次被利用。这种处理方法减少了废水的排放量、环境风险,还达成了污染物的资源化,提高整个工艺系统的经济性与环保效益。

污泥和浓水处理与在线监控、能耗优化举措相互配合,能让工艺包在保持高效去除氟和TDS的同时,实现废水零排放、资源化管理,为工业废水的可持续治理给出了完整的技术解决办法。

## 4 案例分析与工程应用

### 4.1 工业试点运行

在某电解工业园区对优化工艺包展开连续试点运行,历经六个月时间,每日处理废水量大约为1500立方米。运行之际,工艺各个单元维持稳定协调状态,出水氟离子浓度长时间被控制在1mg/L以下,TDS浓度稳定在1200mg/L以内,充分符合工业循环回用水质要求。膜单元于高TDS负荷状况下运行稳定,通量衰减速率控制在5%以内,通过周期性冲洗、在线监测有效抑制了膜结垢现象。预处理、化学沉淀、高级氧化等单元共同发挥作用,让系统得以应对废水水量和水质的波动,保障整体处理效率。试点运行结果显示,优化后的工艺包在实际工业条件下拥有较高的可靠性和可操作性,为大规模推广提供了充足依据,同时也验证了工艺设计在氟去除、盐分控制方面的科学性与有效性。

### 4.2 工艺经济性评估

对优化工艺包与传统单一反渗透工艺的运行成本、资源消耗展开了对比分析。分析结果表明,优化工艺借助降低膜单元运行压力、控制回收率、优化药剂投加量,达成了能耗下降约18%,药剂使用量减少约12%,污泥产量控制在传统工艺的60%左右,使得经济性、环保效益得到明显改善。生命周期分析进一步说明,优化工艺在废水零排放和资源化利用方面有着出色表现,浓水中的氟盐经由结晶和回收能够用作工业原料,减少了二次污染。优化设计的综合成本效益体现出,该工艺在确保水质达标的条件下,达成了运行费用、能源消耗的双重降低,为高氟高TDS废水的可持续治理提供了有效途径。

### 4.3 推广应用可行性

优化工艺包运用的是模块化设计,针对不同工业企业水量与水质的波动情形,可灵活调节单元规模,适用于冶金、电解、化工等诸多存在高氟高TDS废水的场景。此工艺于实际运行时呈现出良好的适应性与稳定性,能够长时间保持出水水质达标,还可降低环境排放风险。该工艺的推广使用有助于处理工业水资源紧缺难题,也能有效减轻氟污染对周边环境的影响,达成废水循环利用、资源化管理。凭借标准化的工艺模块和运行控制策略,优化工艺包具备较高的工程推广价值,为行业废水治理给出了可复制

且可持续的技术解决办法。

## 5 结语

含氟且 TDS 高的工业混合废水处理起来难度较大，对工艺的要求也比较高。本文针对废水特性展开分析，对深度处理回用工艺包予以优化，达成了预处理、膜分离、化学沉淀、高级氧化的高效组合。经由实验、试点运行验证可知，优化后的工艺包能够稳定地去除氟与 TDS，使出水水质符合工业回用标准，与此同时降低运行成本、能耗，达成污染物的资源化利用。此项研究为高氟高盐工业废水的安全回用给出了可靠的技术方案，对于推动工业废水治理、水资源循环利用具备重要的应用价值。

## 参考文献：

[1] 张传兵. 焦化废水的深度处理方法和深度处理装置. 河南省, 华夏碧水环保科技有限公司, 2021-07-06.

[2] 伍波, 叶昌明. 江西某工业园区废水的深度处理[J]. 中国给水排水, 2019,35(02):97-99.

[3] Rashid A. 不同气候条件地区高氟高砷地下水的空间分布、来源解析、地球化学以及环境同位素控制作用[D]. 中国地质大学, 2023.

作者简介：徐迎春（1980.02-），男，汉族，本科学历，高级工程师，河北，主要从事建筑及市政工程领域的工程总承包工作。