



工业废水混凝结晶深度除氟技术创新与工程实践

汇报人：合肥工业大学 王伟 教授、博士生导师

目录 CONTENT



01 项目背景



02 目标及技术路线



03 研究内容



04 项目成果

1 研究背景

2024年7月，党的二十届三中全会《决定》明确提出——

“完善推动**新一代信息技术、人工智能、新能源、新材料、高端装备、生物医药、量子科技**等战略性新兴产业发展政策和治理体系，引导新兴产业健康有序发展。

2025年《政府工作报告》“因地制宜发展新质生产力，加快建设现代化产业体系。推动科技创新和产业创新融合发展……深入推进战略性新兴产业融合集群发展；开展新技术新产品新场景大规模应用示范行动。

66大国家级战略性新兴产业
集群重点领域分布



全国战新
产业集群

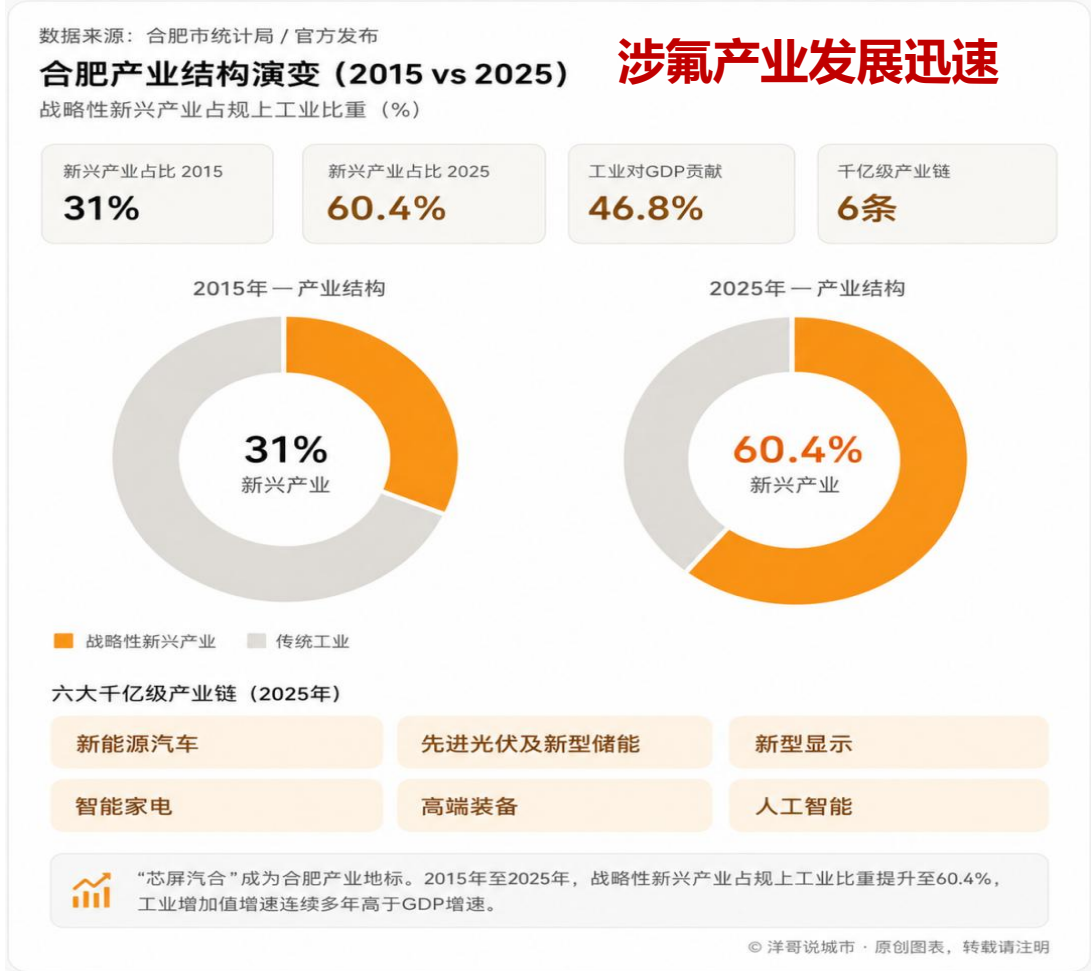
安徽战新
产业集群

生产工艺涉氟
人工智能产业
集成电路产业
新型显示器件
先进结构材料



1 研究背景

- 2025年我国战新产业增加值占GDP的比重预计超过17%，地位更加凸显
- 安徽省战新产业产值占规上工业比重45.4%，合肥市占比更是高达60.4%



1 研究背景

涉氟产业快速发展，全国每年含氟废水排放量超亿吨！

国家系列政策驱动

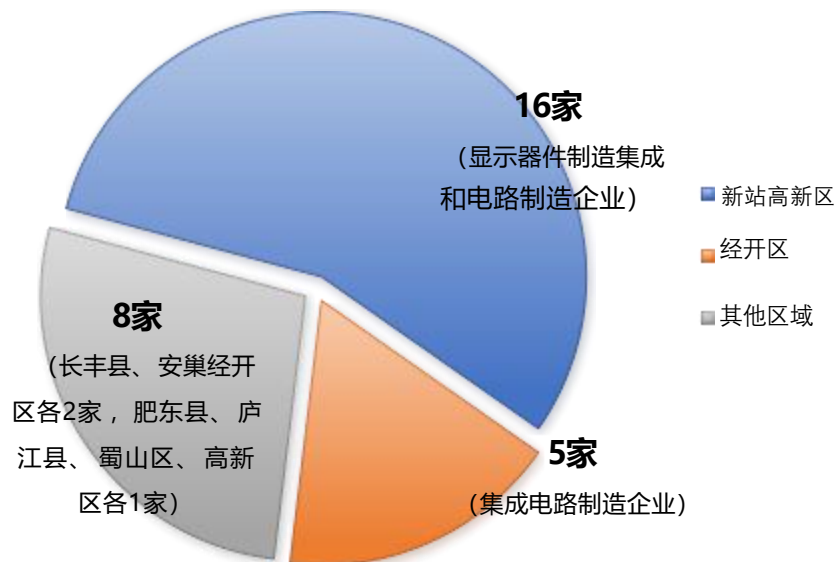
企业综合产能扩张

园区物理空间拓展

相当于每天向巢湖流域排放一个小型水库的含氟废水

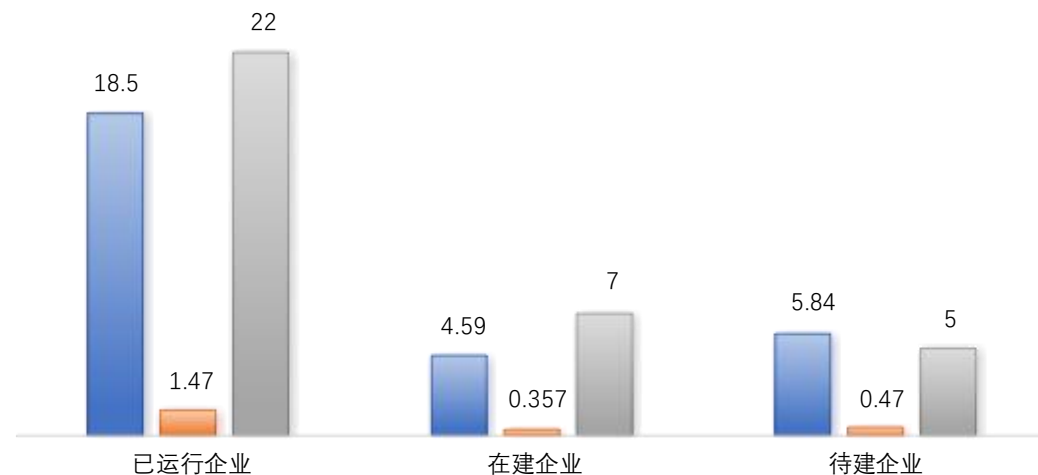
仅以合肥市为例，现有涉氟废水排放的工业企业**29家**，初步估计每天产生含氟废水约**28万吨**。除经开区2家企业废水最终排放至王桥小河（属淮河流域）外，**其余27家均最终排放至巢湖流域**

全市含氟废水排放企业分布情况



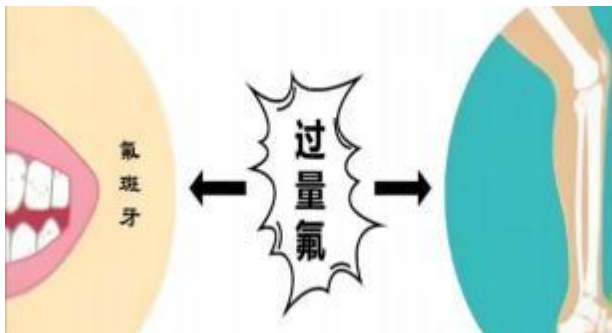
全市含氟废水日排放情况

■ 含氟污水 (万吨) ■ 氟化物 (吨) ■ 产业数量 (家)



1 研究背景

氟过量将引发系列的健康和环境问题



慢性氟中毒、氟斑牙、氟骨症等疾病

水污染、土壤污染、生物富集效应

- 对人体健康影响：慢性氟中毒（氟斑牙，氟骨症等疾病）
- 对生态环境的影响：水体污染，土壤污染，生物富集效应
- 多个流域氟化物浓度日益升高，氟化物环境容量逐年降低

产业规划先行

政策与科技双轮驱动

《地表水环境质量标准》(GB3838-2022) III类水质规定氟化物浓度 $\leq 1\text{mg/L}$

《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022) 规定水体氟化物浓度要求 $\leq 1\text{mg/L}$

治理路径：点面结合，企业内分类节水与分氟排放、园区内集中管控与分氟处理

1 研究背景

芯片光刻蚀氟、光伏制绒渗酸、电池电解溶盐、面板显影释痕



关键工艺： 晶圆光刻显影阶段使用**氢氟酸** (HF) 清洗表面氧化物及金属杂质，蚀刻硅片形成电路结构。

氟源解析： 清洗液残留导致废水中**氟化物浓度高达数百mg/L**，且氟离子与硅反应生成难降解的氟硅酸盐。



芯片产业中光刻显影与清洗工艺释氟



关键工艺： 硅片制绒采用**硝酸/氢氟酸** (HNO_3/HF) 混合液刻蚀表面，形成减反射微结构以提升光电效率

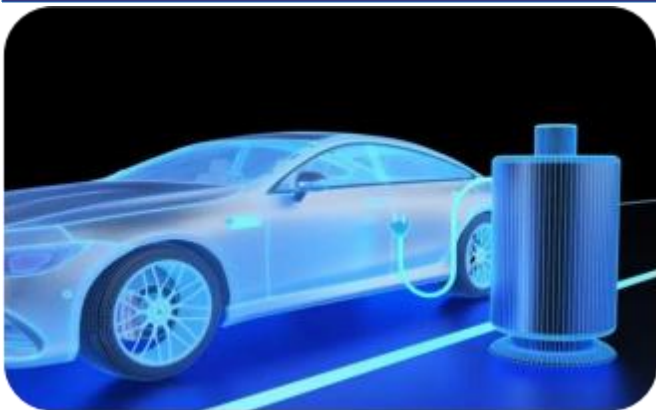
氟源解析： 清洗废水中**氟化物浓度可达数千mg/L**，兼具强酸性与高毒性



光伏产业中硅片制绒与刻蚀工艺渗氟

1 研究背景

芯片光刻蚀氟、光伏制绒渗酸、电池电解溶盐、面板显影释痕



关键工艺：半固态电池电解液含**六氟磷酸锂** (LiPF_6)，高温或水解条件下分解生成氟化氢 (HF)。

氟源解析：电解液泄漏或报废电池处理时，**氟化物释放量可达数千mg/L**，且易与重金属形成复合污染。



新能源电池制造 工艺中电解液分解与电极制备溶氟



关键工艺：显示面板蚀刻采用**氢氟酸** (HF) 去除玻璃基板表面氧化层，显影液含氟化物

氟源解析：单产线日排放含氟废水超千吨，**氟化物浓度也高达数千mg/L**，需多级沉淀处理方可达标



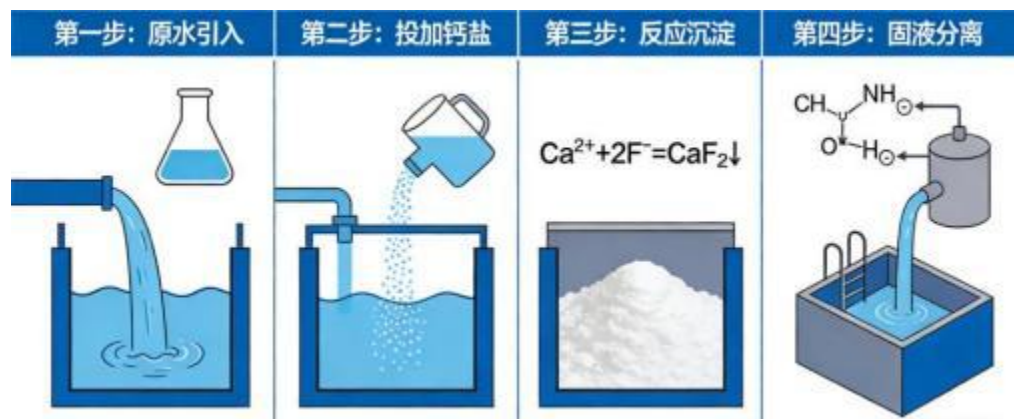
显示器产业 中面板蚀刻与显影液残留释氟

1 研究背景

高浓度含氟废水处理技术

• 高浓度含氟废水治理主流技术 ➡ 钙法除氟

俗称化学沉淀法，通过加入石灰或 CaCl_2 生成 CaF_2 沉淀。



技术成熟

药剂成本低



固废产量大

深度除氟能力不足

氟化钙不同温度下溶解度

温度 (°C)	氟化钙溶解度 (g/L)	氟离子 (mgF/L)
0	0.010	4.87
18	0.015	7.31
25	0.016	7.80

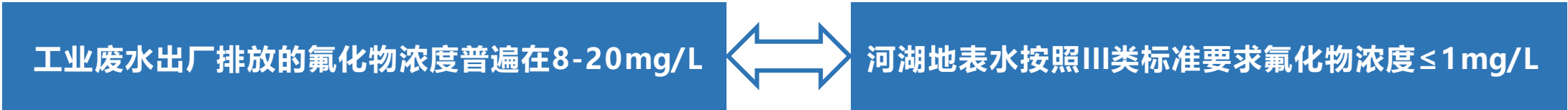
氟化钙在18 °C时水中的溶解度约15-17 mg/L，理论上钙法除氟的出水氟浓度约7-8 mg/L

在实际工程运行中，单纯钙法除氟由于氟化钙溶解度的限制，出水氟浓度仍有8-20 mg/L左右，若废水处理后排入自然水体或循环利用则需进一步的深度除氟

1 研究背景

含氟废水深度处理技术需求

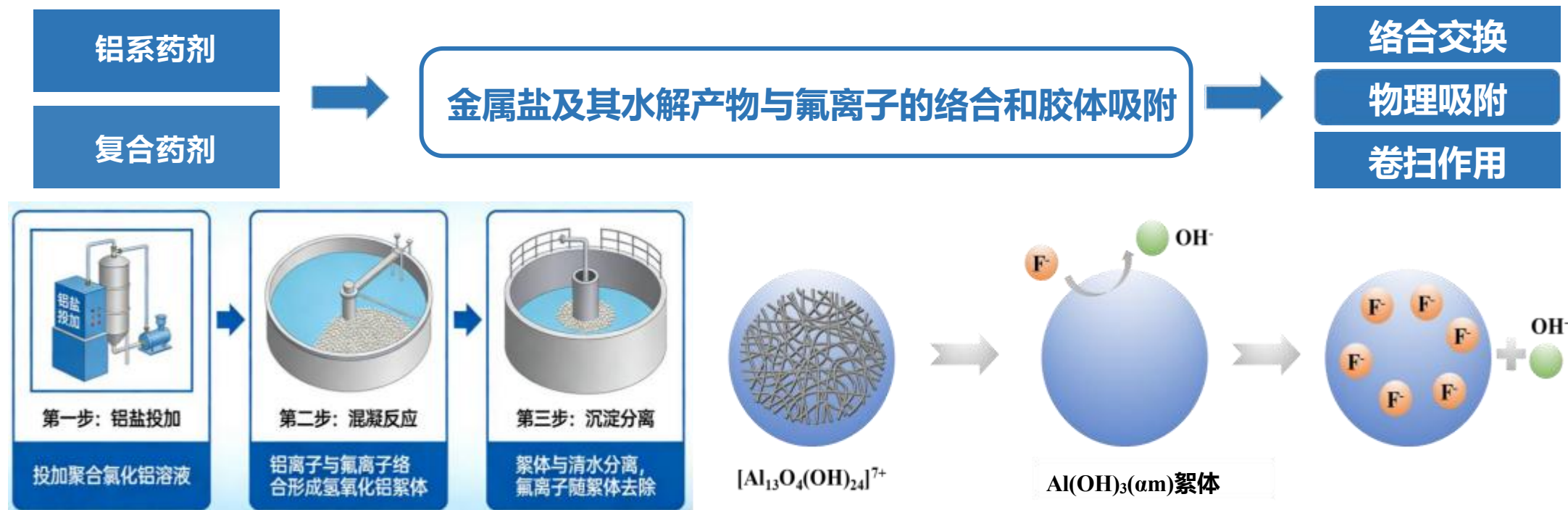
政府关于水中含氟量限值文件			合肥战新产业含氟废水排放标准表	
标准名称	标准编号	氟化物浓度要求	执行的排放标准	产业数量
《电池工业污染物排放标准》	(GB304842013)	≤8.0mg/L	20mg/L	3家
《电子工业水污染物排放标准》	(GB397312020)	≤10.0mg/L		
《国家污水综合排放标准》	(GB89781996)	≤10.0mg/L	10mg/L	17家
《地表水环境质量标准》	(GB38382002)	III类水≤1.0mg/L	8mg/L	6家
		IV类水≤1.5mg/L		
《生活饮用水卫生标准》	(GB57492022)	≤1.0mg/L	4mg/L	1家
《城市污水再生利用工业用水水质》	(GB/T199232024)	≤2.0mg/L		
《农田灌溉用水水质标准》	(GB50842021)	≤2.0mg/L	1mg/L	1家



含氟废水深度处理要满足除氟效果好、除氟效率高、固废产量低、易操作控制、处理成本低的工程需求，对除氟技术的选择提出了更高的要求！

2 技术现状

深度除氟的主流技术：混凝沉淀法



工程案例表明**混凝沉淀工艺能达到较好的除氟效果，出水氟浓度可降至1.0 mg/L以下**

pH控制要求高

药剂投加量大

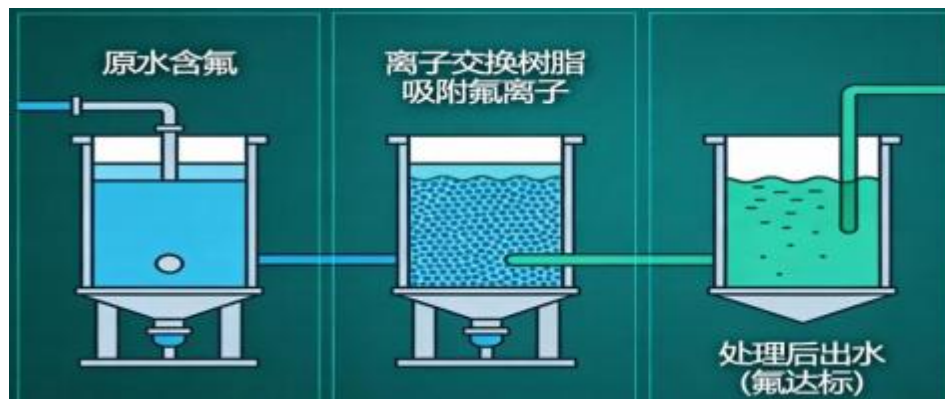
高剂量下存在反弹风险大

2 技术现状

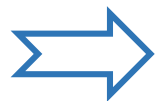
深度除氟的主流技术：离子交换法

离子交换树脂

由网状骨架和活性基团组成，基团上带有可交换的离子；树脂饱和后，用酸碱处理恢复交换能力；再生液仍需进一步处理。



离子交换树脂上的功能基团对氟离子具有交换性能



将废水中氟离子交换到树脂中，达到除氟目的

出水氟浓度可低于1.0 mg/L，适合低浓度、低污染水处理

再生频繁/材料更换/处置

离子干扰大

操作维护较复杂

2 技术现状

深度除氟的主流技术：反渗透膜法

反渗透膜通过高压驱动和选择性渗透机制分离氟离子

污水在膜表面流动，大部分水透过反渗透膜成为纯水，氟离子等杂质被截留在浓水侧

通过高压泵驱动
污水通过半透膜



阻止大部分离子
和分子，只允许
小分子物质通过

出水水质好，氟浓度可达**0.1-0.5mg/L**，能够满足最严格的**饮用水标准**

投资成本大

维护费用高

极易堵塞

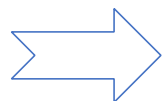
浓水处理难度大

2 技术现状

深度除氟的主流技术：吸附材料

利用活性氧化铝、骨炭、沸石、稀土材料、铝渣等材料吸附水中氟离子

孔隙介质吸附剂



比表面积、配位点、孔隙率、官能团



活性氧化铝



骨炭



沸石



稀土材料



铝渣

吸附材料来源丰富，除氟效率高，出水氟浓度降至1.0 mg/L以下

吸附容量有限

固废产量大

材料吸附性能差异大

2 技术现状

不同深度除氟技术的综合对比

深度除氟技术	优点	缺点
混凝沉淀法	工艺简单、成本低、处理水量大	除氟精度不足，除氟效率低、污泥量较大
离子交换法	除氟精度高，树脂可再生复用	易受离子干扰，预处理要求高，再生频繁
反渗透膜法	除氟效率高，处理效果好	投资/运行成本高，膜易堵塞，浓水需处置
吸附材料法	操作简便，吸附速率快	吸附容量低，更换繁琐，固废成本偏高

在大规模含氟废水处理工程项目中，**混凝沉淀法**是优选技术方案，**如何提高混凝沉淀工艺的除氟效果和效率、降低药剂用量与污泥产量成为技术突破的关键！**

3 技术创新

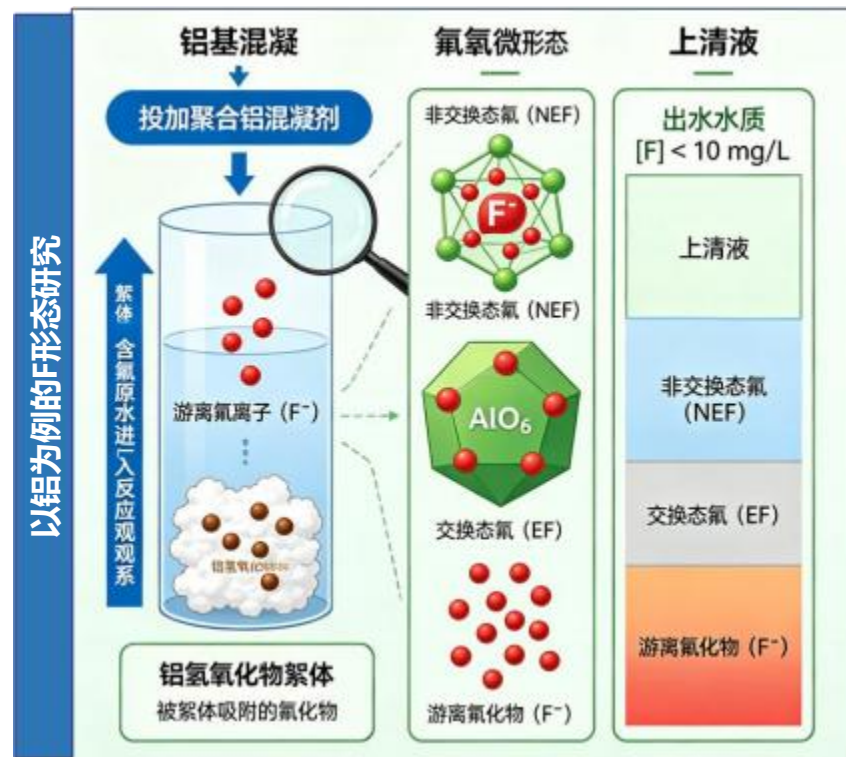
氟的不同形态：有机氟化物/无机氟化物

有机氟化物

- 主要为人工合成污染物
- 多存在于工业废水，如氟化工、电子电镀、纺织印染废水
- 常见类型包括全氟辛酸（PFOA*）、全氟辛烷磺酸（PFOS*）、氟代烃、氟代芳香族化合物等
- 这类氟化物结构稳定、难降解，需采用强化混凝、高级氧化、吸附树脂等专用工艺处理

无机氟化物

- **游离态氟离子（F⁻/HF）**：废水中氟最主要的存在形态，也是水质监测和除氟的核心目标。
- **络合态氟离子**：当水中存在Fe³⁺、Al³⁺等金属离子时，F⁻会与之形成稳定的络合离子，这类络合态氟化物稳定性强，无法被常规除氟工艺直接去除，需通过破络转化为游离态F⁻后再处理。
- **难溶性氟化物**：水中F⁻与Ca²⁺、Mg²⁺等结合可形成CaF₂、MgF₂等难溶性盐，在水质硬度较高的废水中，这类沉淀会以悬浮或沉泥形式存在，属于潜在的氟释放源。



3 技术创新

氟的检测方法：预蒸馏对检测的重要性



七、氟化物·····	187
(一) 预蒸馏·····	187
(二) 离子色谱法 (B) ·····	189
(三) 离子选择电极法 (A) ·····	189
(四) 氟试剂分光光度法 (A) ·····	193
(五) 茜素磺酸锆目视比色法·····	195

关于氟化物的监测中，明确指出
【对于污染严重的生活污水和工业废水，以及含氟硼酸盐的水样均要进行**预蒸馏**】

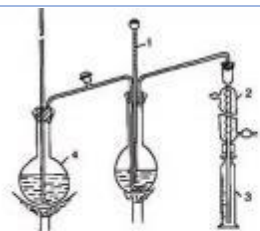


图 3-2-7 氟化物水蒸气蒸馏装置图
1—温度计；2—冷凝器；3—接收器；4—蒸汽



图 3-2-8 氟化物直接蒸馏装置
1—温度计；2—1L 烧瓶；3—接收器；
4—温度计；5—内径 12mm 的直接管；
6—连接管；7—冷凝器；8—100ml 量瓶；
9—ST2440 接头；10—ST2440 接头

氟化物蒸馏装置例

蒸馏法是利用**高氯酸**和**高温**对废水中氟化物进行分离富集的预处理措施



将稳定的氟络合物转化为游离氟离子并蒸馏分离，实现总无机氟的精准测

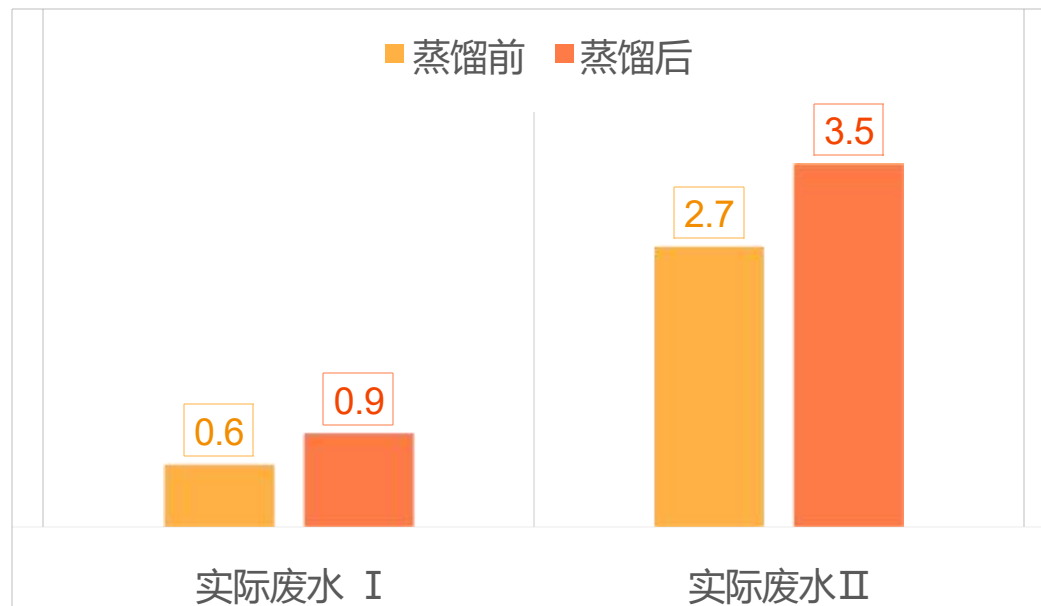
定，避免因络合态氟检测不完全导致的结果偏低问题

3 技术创新

预蒸馏对氟检测的影响



蒸馏装置示意图



实际废水预处理前后氟浓度检测

未经过蒸馏预处理水样与蒸馏预处理水样相比，检测出的氟浓度整体偏低

实际废水普遍存在20%-30%的**难解离氟化物**在去除过程中被忽视！

针对这一被忽视的问题，我们另辟蹊径，将靶向解决难解离氟作为技术攻关的首要目标！

3 技术创新

基于“南北豆腐”差异的结晶重构与诱导强化

豆腐点卤差异与结构启发



南豆腐(石膏点卤)

质地细嫩，结构松散
(普通絮体类比)



北豆腐(盐卤点卤)

质地坚韧，结构紧密
(强化絮体类比)



南豆腐多使用悬浮液，控制点脑温度、搅拌强度以保持持水性

搅拌

温度

凝固剂

。 。 。



活化条件

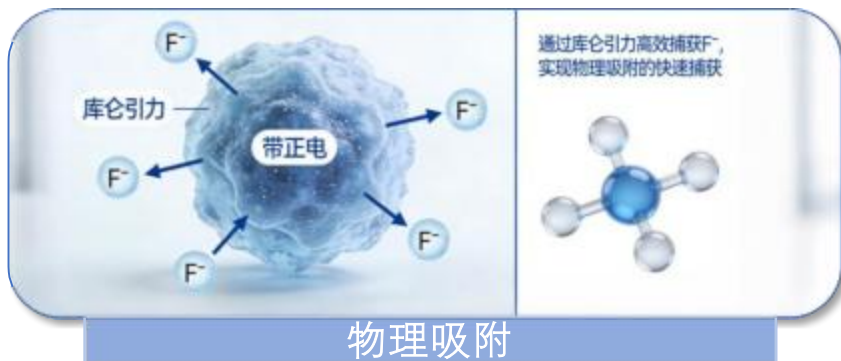
北豆腐控制温度和连续搅动，添加凝固剂，质地紧实

从除氟药剂特性出发，通过结晶和活化作用形成具有强吸附氟性能的多价态金属有机骨架化合物

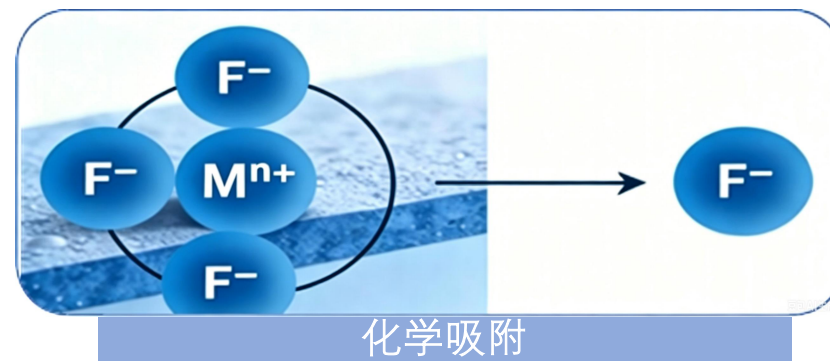
3 技术创新

除氟药剂的配位/静电双位点强化与多孔结构效能提升

以配位作用的化学吸附为主，絮体表面静电引力的物理吸附为辅



除氟药剂水解后会形成大量带正电的化合物絮体，絮体表面的正电荷可通过库仑力快速吸附水体中的 F^-

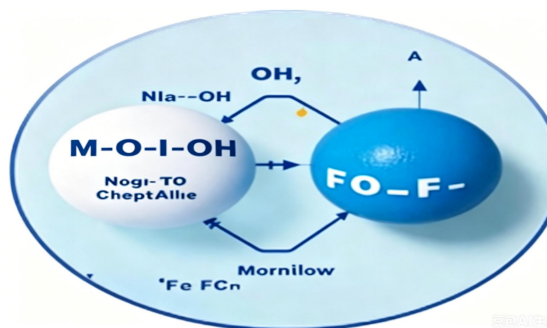


除氟药剂解离出的金属离子 M^{n+} 存在空轨道作为配位中心与 F^- 形成配位键，二者发生配体交换反应并形成稳定的化学键，不易解离

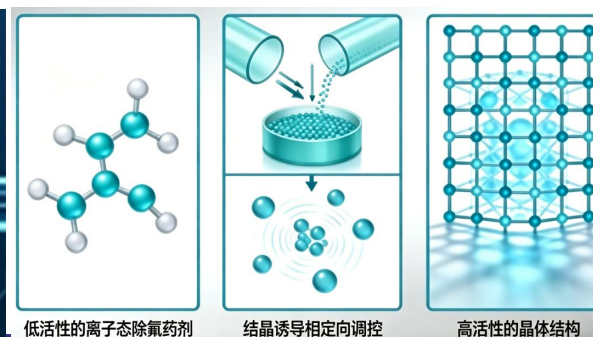
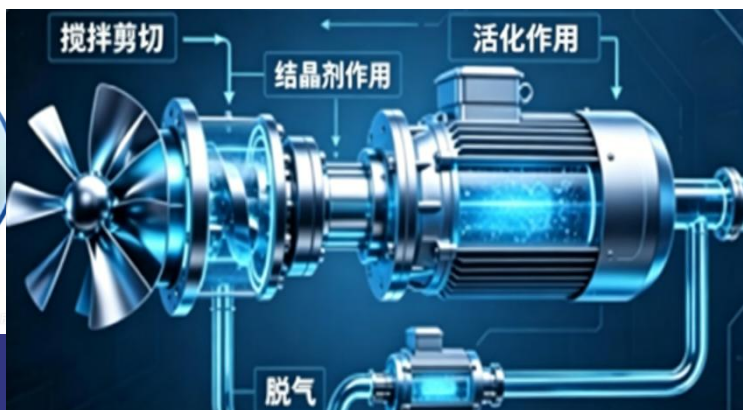
在原生吸附位点的基础上，通过**结晶作用**增加离子碰撞和配体交换的可能性，利用**活化作用**增加除氟药剂化学吸附的位点，开发靶向去除难解离氟化物的**工艺装备与结晶药剂**

3 技术创新

结晶与活化协同除氟



除氟药剂



结晶活化增加吸附位点

晶弗智控装备



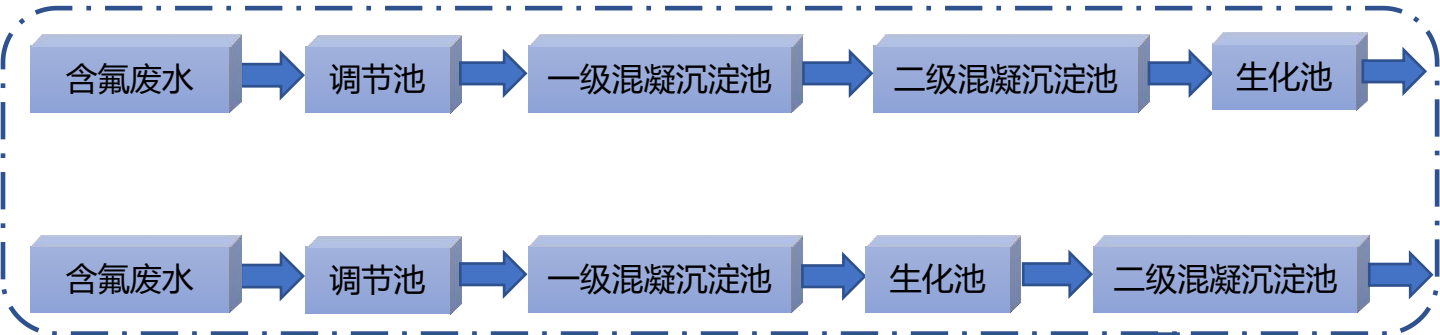
让除氟药剂经历“**定向调控**→**结晶活化**”的重构过程，从低活性的离子态转变为高活性的**多价态金属有机骨架化合物**，对应的**配位点显著增加**

基于结晶活化原理的混凝结晶工艺能够发挥‘基础捕获+精准增效’的协同沉淀/吸附作用，
提高废水中氟化物去除效果和效率，降低除氟药剂用量和污泥产量

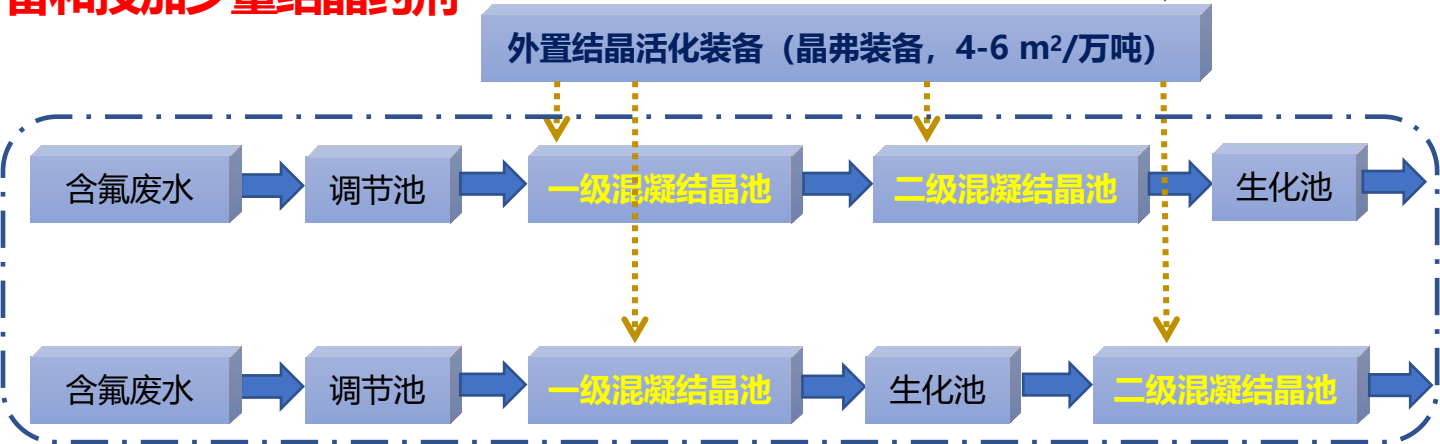
3 技术创新

工艺流程图

已建的混凝除氟工艺



升级为混凝结晶除氟工艺，不需要改变原有构筑物结构和功能，不替换原有性价比高的除氟剂，仅外置结晶活化装备和投加少量结晶药剂



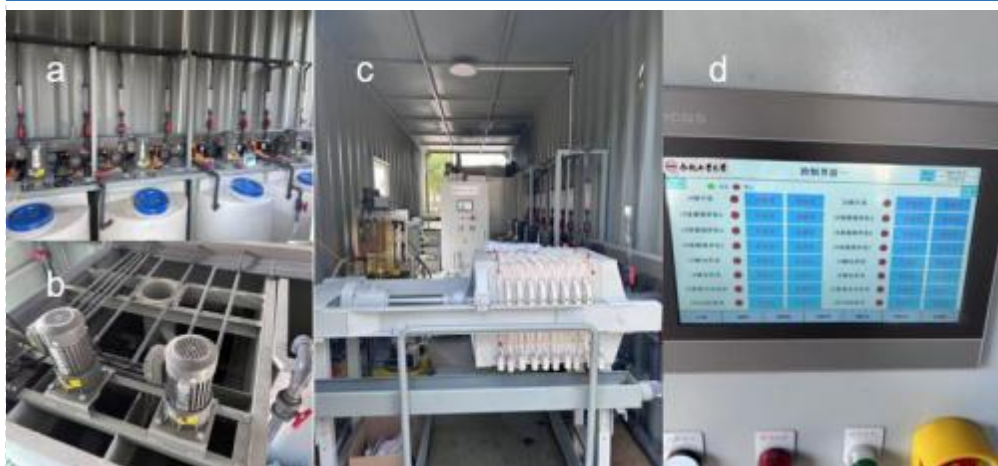
设计参数介绍

模块	核心信息
设备尺寸	14m × 5m × 3m (水深按 2.6m 设计)
有效容积	1# 一级混凝沉淀池: 33 m³ 2# 二级混凝沉淀池: 34 m³ 总容积: 67 m³, HRT: 1.6 h
处理能力	设计日处理水量 1200m³/d
系统组成	三级机械混合反应区 → 稳流布水区 → 斜管沉淀区 → 污泥浓缩斗 → 配套排泥、加药、电控系统

4 工程验证-百吨装备

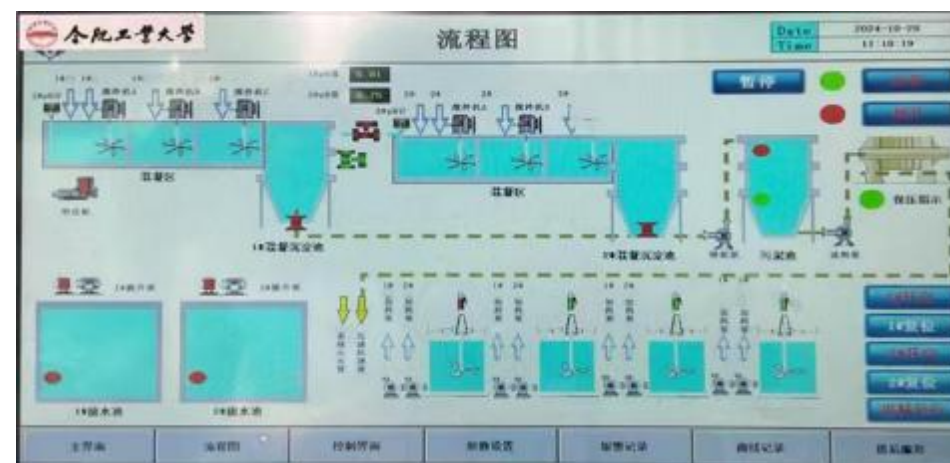
工程示范装备-百吨级装备

示范装备

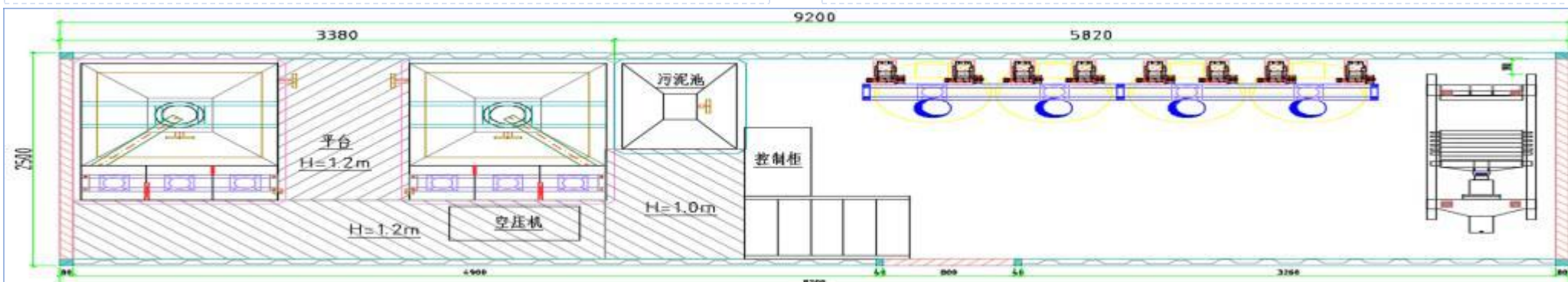


(a) 加药系统 (b) 反应系统 (c) 外观一览 (d) 控制系统

工艺流程图



各个池及管线排布图



百吨级装备平面图

4 工程验证-百吨装备

百吨级装备-含氟废水YW厂

工程验证场所



电子、屏显等产业集中

工业园区

上游承接屏显行业和部分居民生活用水，氟的来源为屏显刻蚀清洗液等，取水点为二沉池出水。

YW水源特征：浑浊，含氟废水与生活污水混合，水质较为稳定

进水氟化物浓度2-4 mg/L

进水增氟至8-9 mg/L

经过混凝结晶工艺处理后，
能够将出水氟浓度控制在

0.5-0.8 mg/L

经过混凝结晶工艺处理后，
能够将出水氟浓度控制在

0.7-0.9 mg/L

4 工程验证-百吨装备

百吨级装备-含氟废水CG厂

工程验证场所



2025.09
至
2026.03

存储，电路集
成等产业集中



上游承接芯片行业废水，氟的来源为芯
片刻蚀清洗液等，取水点为进厂原水

CX水源特征：COD高，电导率高，含氟混合废水

进水氟化物浓度3-7mg/L

进水增氟至8-9 mg/L

经过混凝结晶工艺处理后，
能够将出水氟浓度控制在
0.5-0.8 mg/L左右

经过混凝结晶工艺处理后，
能够将出水氟浓度控制在
0.7-0.9 mg/L左右

4 工程验证-干吨装备

干吨级装备-工程示范场地

为探究工艺放大性
进行量级对比实验



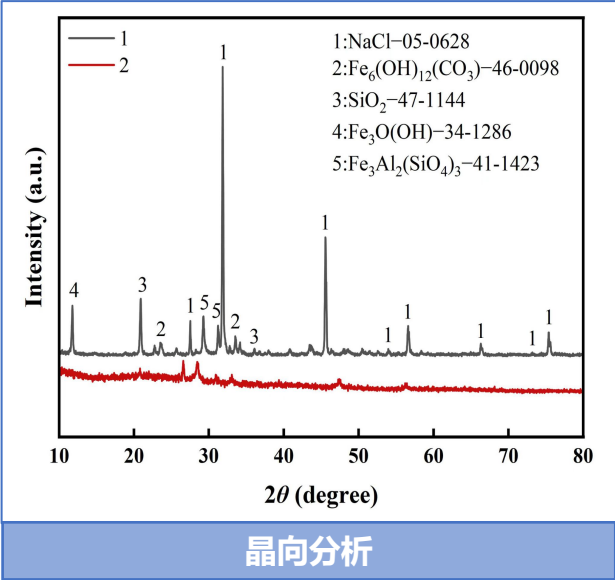
研制干吨级装备在CG厂
进行持续性研究

2026.03-至今



装置取水点

指标	数值	单位
氨氮	29.5	mg/L
硝态氮	1.45	mg/L
总磷	0.015	mg/L
COD	630	mg/L
电导率	1875	μS/cm
pH	6.88	-



CX水源特征：含氟混合废水，水质波动较大，氟浓度为5-7mg/L左右

4 工程验证-千吨装备

工程示范装备-千吨级装备



装置背部管线



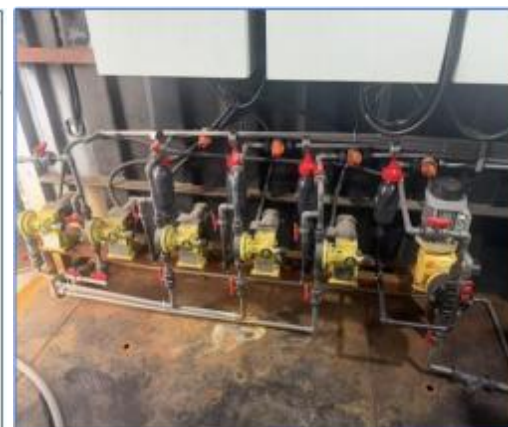
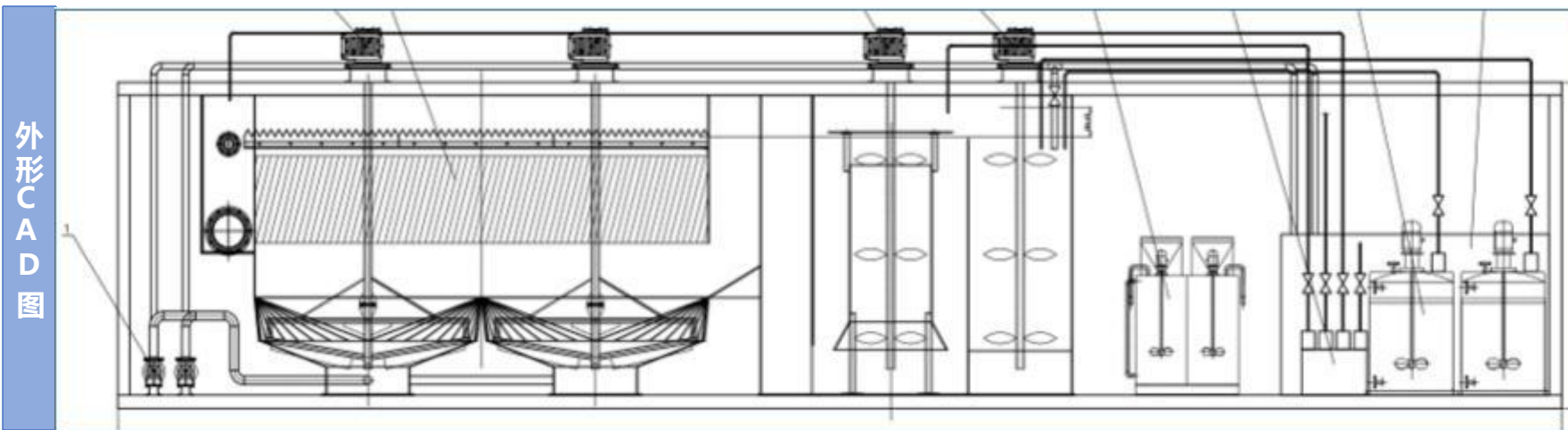
装置外立面



混凝剂投加系统



控制系统-部分



结晶剂投加系统

4 工程验证-千吨装备

工程示范装备-千吨级装备

CG污水厂-千吨级装置的除氟性能探究



一级出水氟离子浓度
 4.9 ± 0.8 $\rightarrow$ 2.0 ± 0.8

全程稳定在**50%+**，最高至**73.0%**，且出水氟均在**3ppm**及以下，为诱导段的提供了达标保障



总出水氟离子浓度

4.9 ± 0.8 $\rightarrow$ 0.7 ± 0.2

全程稳定在**85%+**，最高达**91.1%**，且出水氟均在1ppm以下，抗风险和冲击能力强

晶弗智控装备+晶弗药剂1#



药剂成本

< **1.0 元/吨水**



产泥干重

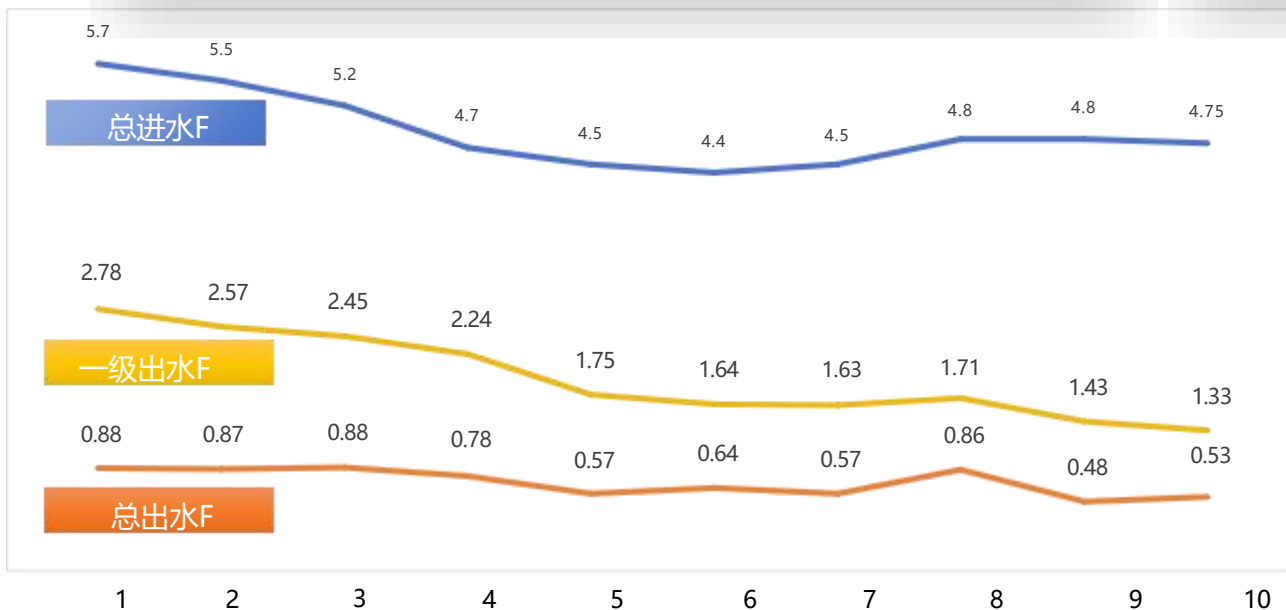
0.17kg/吨水



出水氟离子浓度低于

1.0 mg/L标准

符合《地表水环境质量标准》Ⅲ类水 $\leq 1.0\text{mg/L}$



4 工程验证-千吨装备

工程示范装备-千吨级装备

低氟浓度-常规工艺与混凝结晶工艺对比

对比工况

处理目标	出水氟离子浓度稳定低于1.0 mg/L
树脂吸附	进水氟浓度 ≈ 3 mg/L
晶氟工艺	进水氟浓度 = 4.9±0.8 mg/L

优势对比

- 直接成本显著降低：混凝结晶工艺吨水药剂成本<1.0 元/t, 低于树脂工艺的1.11元/t
- 单位去除成本优势巨大：混凝结晶工艺氟去除成本小于0.25元/gF, 远低于常规工艺的0.555元/gF, 成本降幅高达50%
- 处理负荷更高：混凝结晶工艺氟耐受浓度范围更大, 产泥干重更低

核心成本效能对比分析

对比项目	树脂吸附	混凝结晶工艺	关键优势分析
药剂成本 (元/吨水)	0.98	<1	药剂投加量更少, 成本更低
耗材成本 (元/吨水)	0.129	无	无核心耗材更换需求, 低维护
吨水总成本 (元/吨水)	1.109	<1	总成本降低 30%以上
单位F去除成本 (元/gF)	0.555	<0.25	成本降幅达50%以上

混凝结晶工艺: 基于晶体活化原理, 处理负荷高, 出水水质稳定, 且具有优异的成本效益, 适合规模化应用。

树脂吸附工艺: 依赖树脂交换, 需定期再生与更换处置, 耗材成本较高, 处理效率受限

结论：混凝结晶工艺是兼具技术与成本优势的优选方案

4 工程验证-千吨装备

工程示范装备-千吨级装备

中等氟浓度-千吨级装置的性能探究



一级出水氟离子浓度

$8.0 \pm 0.6 \rightarrow 2.8 \pm 0.5$

全程稳定在**50%+**，最高至**73.0%**，且出水氟均在**3ppm**及以下，为2级的确保可达提供了前段保障



总出水氟离子浓度

$8.0 \pm 0.6 \rightarrow 0.7 \pm 0.2$

全程稳定在**85%+**，最高达**91.1%**，且出水氟均在**1ppm**以下，抗风险和冲击能力强

晶弗智控装备+晶弗药剂1#



药剂成本

<1.5元/吨水



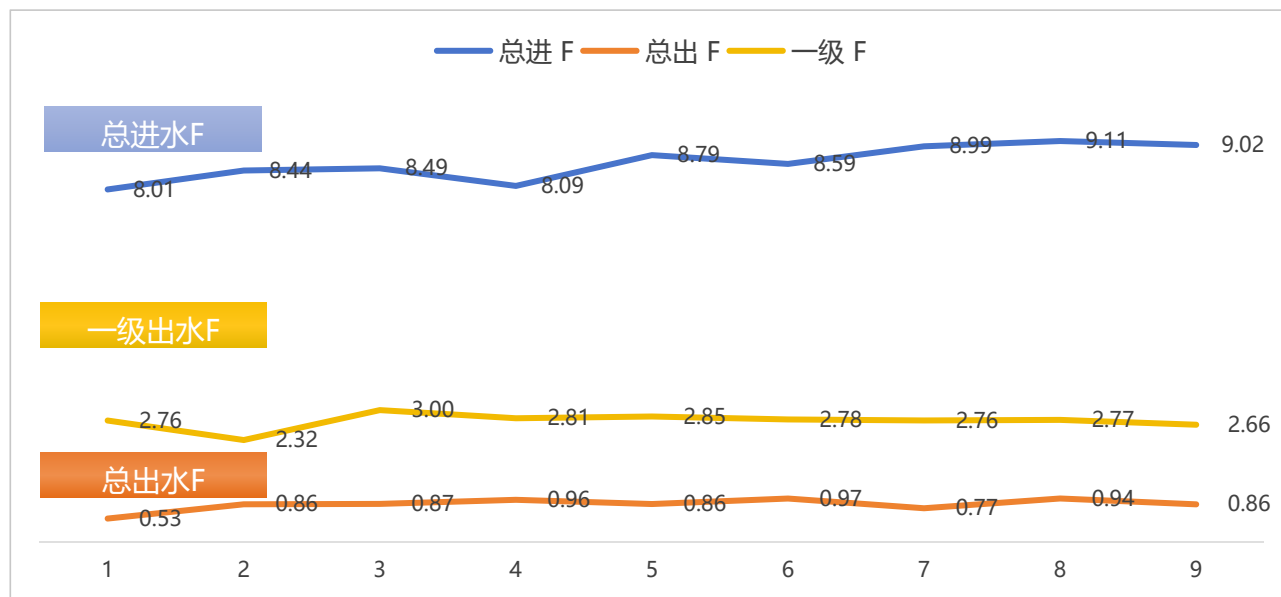
产泥干重

0.2kg/吨水



出水氟离子浓度低于**1.0 mg/L**

符合《地表水环境质量标准》Ⅲ类水 $\leq 1.0\text{mg/L}$



4 工程验证-千吨装备

工程示范装备-千吨级装备

中等氟浓度-常规工艺与混凝结晶工艺对比

对比工况

处理目标	出水氟离子浓度稳定低于1.0 mg/L	
组合工艺	混凝吸附	进水氟浓度 ≈ 8 mg/L
	树脂吸附	进水氟浓度 ≈ 3 mg/L
混凝结晶工艺	进水氟浓度 = 8.0±0.6 mg/L	

优势对比

- 直接成本显著降低：混凝结晶工艺吨水药剂成本 <1.5元/t，较混凝吸附+树脂工艺的3.2元/t降低超50%
- 单位去除成本优势巨大：混凝结晶工艺氟去除成本<0.22元/gF，低于常规工艺的0.963元/gF，成本降幅超50%
- 处理负荷显著更高：混凝结晶工艺的进水氟浓度可放大至20mg/L，产泥干重较现有工艺降幅超50%

核心成本效能对比分析

对比项目	现有工艺			混凝结晶工艺	关键优势分析
	二级混凝沉淀	树脂吸附	组合工艺		
药剂成本(元/吨水)	2.042	0.98	3.022	<1.5	药剂投加量更少，成本更低
耗材成本(元/吨水)	-	0.129	0.129	无	无核心耗材更换需求，免维护
吨水总成本(元/吨水)	2.042	1.109	3.151	<1.5	总成本降低超50%
单位F去除成本(元/gF)	0.408	0.555	0.45	<0.22	成本降幅50%

结论：混凝结晶工艺是兼具技术与成本优势的优选方案

4 工程验证-千吨装备

工程示范装备-千吨级装备

高氟浓度-千吨级装置的性能探究



一级出水氟离子浓度

$20.0 \pm 0.6 \rightarrow 4.5 \pm 0.5$

全程稳定在**70%+**，最高至**75.0%**，且出水氟均在**5ppm及以下**，为2级的确保可达提供了前段保障



总出水氟离子浓度

$20.0 \pm 0.6 \rightarrow 0.7 \pm 0.2$

全程稳定在**85%+**，最高达**95%**，且出水氟均在**1ppm以下**，抗风险和冲击能力强

晶弗智控装备+晶弗药剂1#



药剂成本

< **2.5元**/吨水



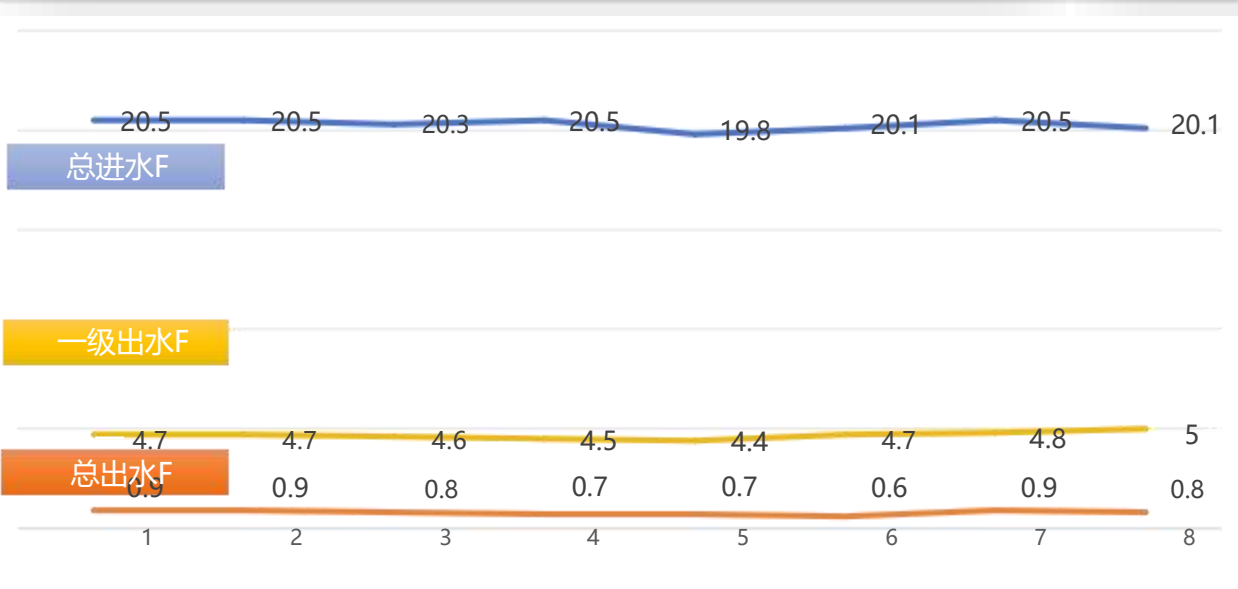
产泥干重

< **0.5kg**/吨水



出水氟离子浓度低于**1.0 mg/L**

符合《地表水环境质量标准》Ⅲ类水 $\leq 1.0\text{mg/L}$



4 工程验证-千吨装备

工程示范装备-千吨级装备

高氟浓度-常规混凝工艺与混凝结晶工艺对比

对比工况

处理目标	出水氟离子浓度稳定低于1.0 mg/L	
组合工艺	混凝沉淀	进水氟浓度 ≈20 mg/L
	树脂吸附	进水氟浓度 ≈3 mg/L
混凝结晶工艺	进水氟浓度 =20.0±0.5 mg/L	

优势对比

- 直接成本显著降低：混凝结晶工艺吨水药剂成本 <2.5 元/t, 较常规工艺的3.4 元/t降低超30%
- 单位去除成本优势巨大：混凝结晶工艺氟去除成本<0.13 元/gF, 低于常规工艺的0.987元/gF, 成本降幅
- 处理负荷显著更高：混凝结晶工艺的进水氟浓度可放大至20mg/L, 产泥干重较现有工艺降幅超30%

核心成本效能对比分析

对比项目	现有工艺				晶氟工艺	关键优势分析
	一级混凝沉淀	二级混凝沉淀	树脂吸附	组合工艺		
药剂成本 (元/吨水)	0.282	2.042	0.98	3.304	<2.5	药剂投加量更少, 成本更低
耗材成本 (元/吨水)	-	-	0.129	0.129	无	无核心耗材更换需求, 免维护
吨水总成本 (元/吨水)	0.282	2.042	1.109	3.433	<2.5	成本降低超30%
单位F去除成本 (元/gF)	0.024	0.408	0.555	0.987	<0.13	

结论：混凝结晶工艺是兼具技术与成本优势的优选方案

4 工程验证-千吨装备

工程示范装备和结晶药剂验证

低浓度组别（晶弗1#）

核心工艺参数 HRT=1.2h

氟浓度（mg/L）

总进水F	5.3±0.5
一级出水F	2.0±0.3
总出水F	0.8±0.1

核心工艺参数 HRT=1.5h

氟浓度（mg/L）

总进水F	5.5±0.4
一级出水F	1.4±0.2
总出水F	0.5±0.1

中浓度组别（晶弗1#）

核心工艺参数 HRT=1.5h

氟浓度（mg/L）

总进水F	8.4±0.2
一级出水F	2.7±0.5
总出水F	0.6±0.2

核心工艺参数 HRT=2.2h

氟浓度（mg/L）

总进水F	8.3±0.3
一级出水F	2.3±0.1
总出水F	0.7±0.1

高浓度组别（晶弗1#）

核心工艺参数 HRT=2.2h

氟浓度（mg/L）

总进水F	20.5±0.5
一级出水F	2.7±0.5
总出水F	0.6±0.1

核心工艺参数 HRT=2.5h

氟浓度（mg/L）

总进水F	20.5±0.5
一级出水F	2.9±0.5
总出水F	0.6±0.2

超高浓度组别（晶弗2#）

核心工艺参数 HRT=4 h

氟浓度（mg/L）

进水F	1400±18
出水F	0.7±0.1
药剂用量约0.8g/L	

核心工艺参数 HRT=6 h

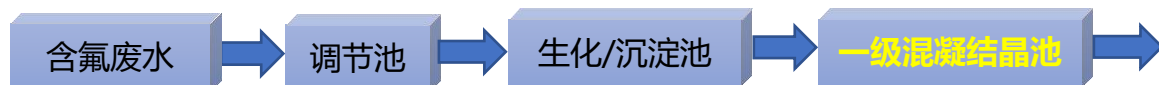
氟浓度（mg/L）

进水F	19000±53
出水F	0.6±0.1
药剂用量约4 g/L	

3 技术创新

新建深度除氟混凝结晶工艺建议流程图

低浓度组（进水1-3mgF/L，出水 $\leq 1.0\text{mgF/L}$ ） 效果可达、基建投资低



中浓度组（进水3-8 mgF/L，出水 $\leq 1.0\text{mgF/L}$ ） 效果可达、运行成本低



高浓度组（进水8-20 mgF/L，出水 $\leq 1.0\text{mgF/L}$ ） 运行成本低、系统稳定性强



产氟企业内高浓度含氟废水处理应结合外排氟浓度要求，设置2-3组混凝结晶池

4 工程验证-检测结果

CG污水厂5月9日水样，水务集团国家级水检中心现场取样分析结果：
装置原水氟浓度**5.40 mg/L**，加至**8 mg/L**

混合区氟浓度**6.75 mg/L（带药）**
装置出水氟浓度**0.53 mg/L**
装置出水氟浓度加标 0.95 mg/L，加标量 0.50mg/L

CG污水厂5月13日水样，水务集团国家级水检中心现场取样分析结果：
原水氟浓度**4.46 mg/L**，加至**20 mg/L**
混合区氟浓度**13.5 mg/L（带药）**
装置出水氟浓度**0.55 mg/L**



样品	检测项目	实测浓度
进水 (mg/L)	氟化物	9.31-9.88
	化学需氧量	48-56
	悬浮物	10
	总磷	0.12-1.38
出水 (mg/L)	氟化物	0.49-0.85
	化学需氧量	33-65
	悬浮物	10
	总磷	0.012-0.07

三次CMA水质检测报告

经CMA测试机构和水务集团水检中心现场取样检测，**混凝结晶工艺**能将**氟离子浓度**从8-20 mg/L降至0.5-0.8 mg/L，出水氟浓度稳定达标

4 工程验证-千吨装备

技术优势和特色

工程核心技术"晶弗-深度除氟一体化系统"
通过自主研发的晶弗智控装备和晶弗药剂的深度耦合,实现对水中氟离子的精准捕捉与高效分离

对比维度	传统钙盐沉淀法	吸附/树脂法	混凝结晶除氟技术	
稳定达标能力	波动大易超标	稳定成本高	连续运行90天达标率100%	已建工程
吨水药剂/材料成本	0.5-1.0元	3.0-5.0元	≤1.0元 (5mgF/L) ≤1.5元 (8mgF/L) ≤2.5元 (20mgF/L)	新增晶弗智控装备不影响已有的土建结构, 新增用电负荷小, 且运行模式可即时切换, 占地面积仅为3-4m²/万吨水, 在不影响出水氟浓度的前提下降低成本、减药减泥
污泥产生量	极大	再生废液外维	与传统混凝工艺相比污泥减量30-50%	新建工程
药剂用量	-	5-10‰	0.8-2.5‰	提供混凝结晶工艺整体技术方案, 在提升深度除氟效能的同时增强工艺的稳定性, 节省工程造价, 大幅度降低废水综合处理成本
出水氟化物浓度	10-20mg/L	≤1.0mg/L	≤1.0mg/L	技术特色
				场景适应广, 企业端高浓度含氟废水与园区端中低浓度含氟废水采用混凝沉淀工艺均可应用 技术先进且成熟, 比现有混凝工艺节约30-50%用药量和产泥量, 自动化程度高, 工艺操作简便

感谢省环保厅科研项目和水务部门

场景支持!

欢迎交流合作!