



Gradient: A Different Kind of Water Company

从除氟到资源回收：流化床结晶技术 在工业含氟废水中的创新实践

钱建江

戈润市场发展总监

1.流化床结晶(FBC)技术

流化床结晶(FBC)技术应用领域

用于代替传统混凝、沉淀、脱水工艺，将废水中可形成沉淀的离子以结晶方式进行去除。

适用于含氟、含重金属、硬度过高等类型废水。

1. 流化床-Fenton (FBR-Fenton)

1.1 药剂： H_2O_2 , FeSO_4

1.2 结晶： FeOOH

2. FBC除氟

2.1 药剂： CaCl_2

2.2 结晶： CaF_2

3.FBC除钙(软化)

3.1 药剂： NaOH , NaCO_3

3.2 结晶： CaCO_3



流化床结晶(FBC)处理技术基本原理

流化床结晶技术概述：

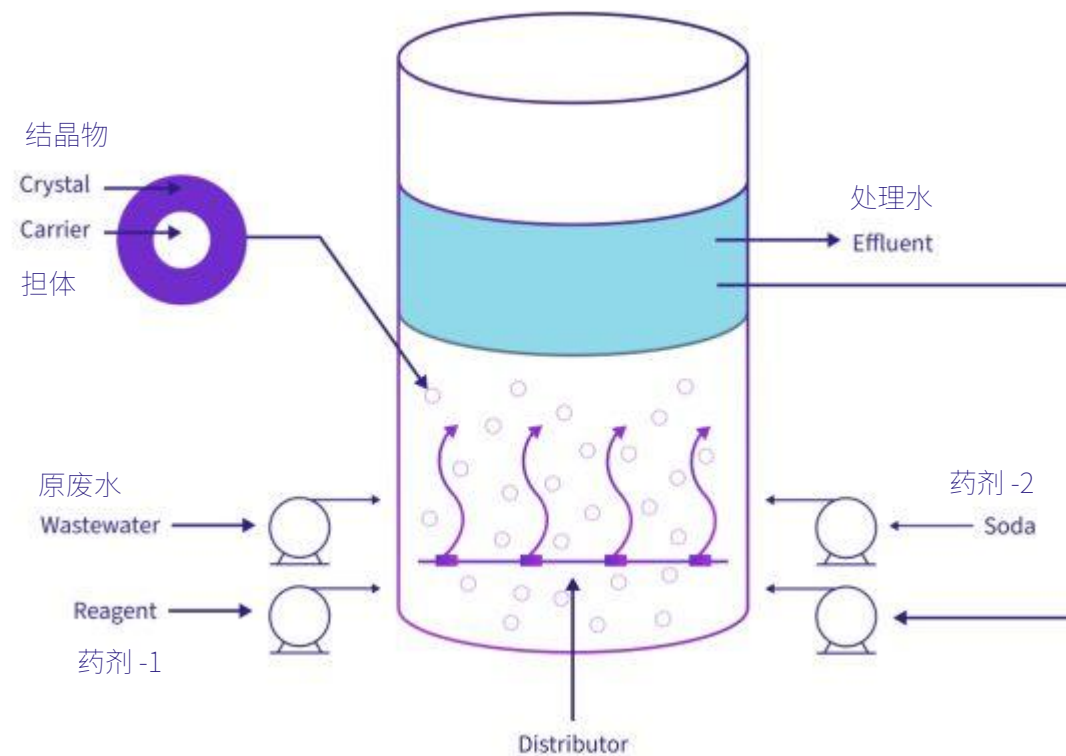
- 将流化床工艺和结晶原理相结合
- 在反应体系中添加固体颗粒作为担体

操作过程：

- 将废水和药剂从反应器底部注入
- 通过调整废水的过饱和度和上升流速来调控结晶过程

结晶过程：

- 离子在担体表面形成稳态结晶
- 结晶达到一定粒径后，排出系统外有效减少水中的离子浓度



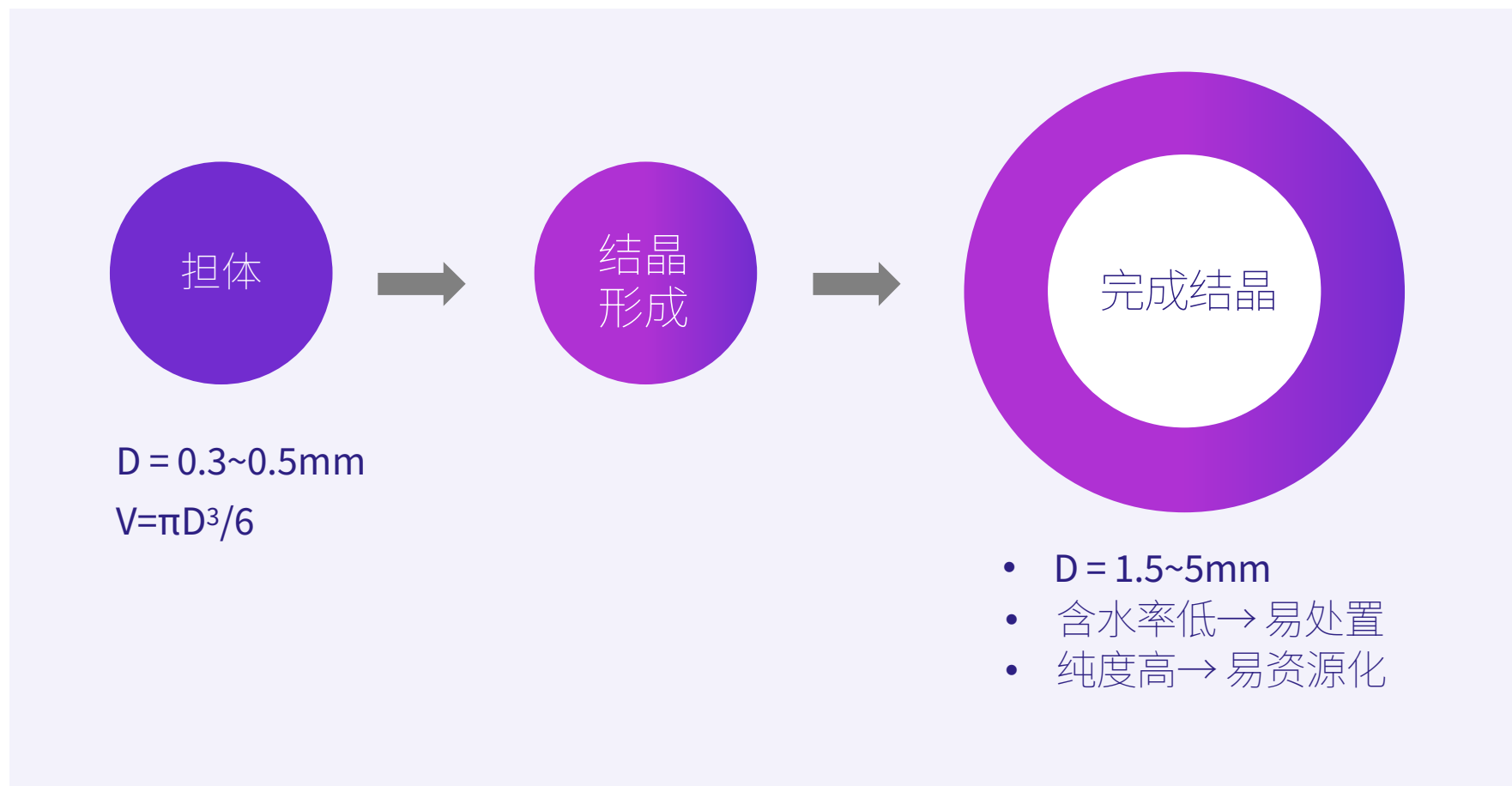
流化床结晶处理装置示意图

流化床结晶(FBC)技术优势



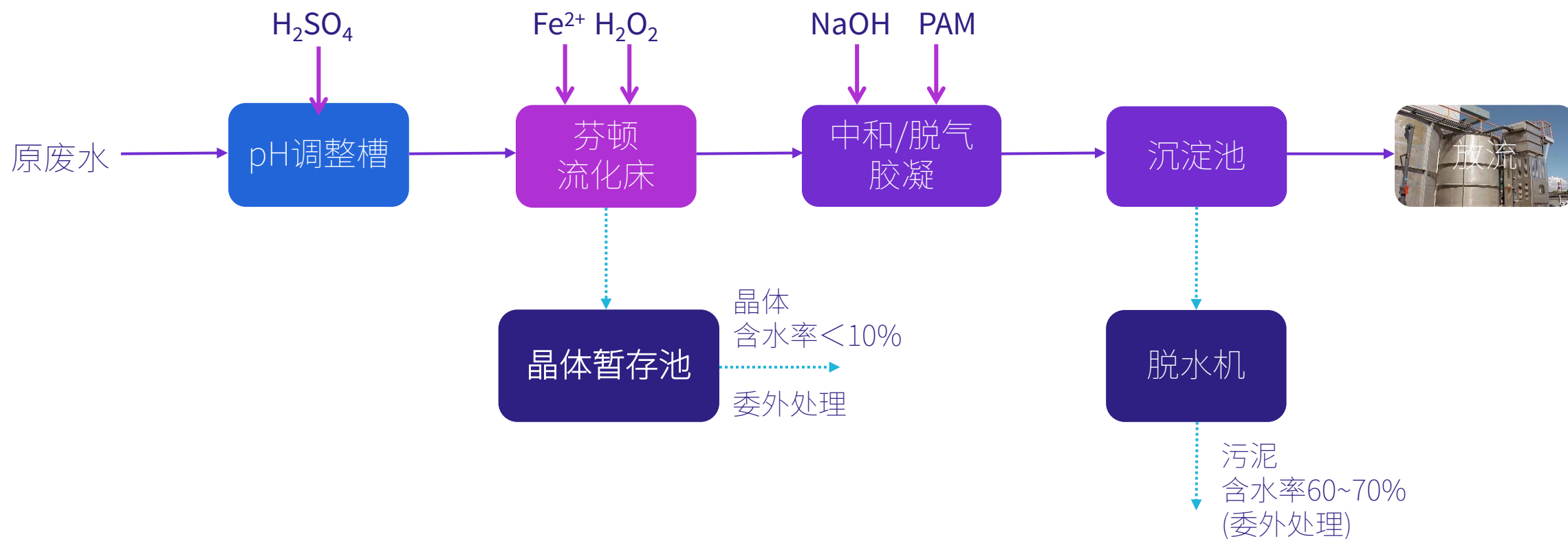
- 污泥产生量少，较传统混凝沉淀污泥可减少50~80%
- 产出晶体含水率10%以下，无须再脱水
- 设备占地面积小
- 产出结晶物可资源化
- 如结合膜分离，可以减少PAM的添加，为后续反渗透系统运行提供保障

担体表面结晶原理



1.1 FBR-Fenton 流化床芬顿

流化床芬顿工艺流程（高级氧化除COD）



流化床芬顿非均相催化反应产物

污染物

非均相催化Fenton反应

加快

非均相催化Fenton反应



一周

一个月

三个月

γ -FeOOH 异相媒介



流化床芬顿技术特点



减少70%污泥

经Fenton反应后之污泥，透过控制饱和浓度，将其结晶于载体上，达到污泥减量效果，减少污泥废弃处理成本

减少亚铁加药量

形成三价铁(Fe^{3+})污泥结晶于载体上， Fe^{3+} 可作为催化剂，进行非均相催化

结晶可回收再利用

于载体上之结晶长至1~2mm时将排砂，其表面为纯净 FeOOH 铁矿物，并且具低含水率特性，使其更方便回收利用

运行成本

参考我司安徽某化工园区污水厂实际运行成本
(COD从 80 mg/L去除至50 mg/L以下)

项目	单价(元/kg)	消耗(产生)量(kg/天)	操作成本(元/天)
98% H ₂ SO ₄	0.5	6000	3000
30% NaOH	1	4500	4500
FeSO ₄ · 7H ₂ O(固体)	0.45	5000	2250
27.5% H ₂ O ₂	1.2	4700	5640
polymer粉状	22	40	880
电力	0.6	3100	1860
每日产水量CMD		20000	
合计(元/天)		18130	
每吨废水操作成本(元/m ³)		0.90	

污泥减量及处理费用比较

评估项目	解决方案	方案一	方案二
		传统Fenton	流体化床Fenton
加药操作成本 (人民币/d)		63800	54800
方案二操作成本(电费+药剂)约每年节省93万			
废弃污泥/结晶量 (ton/d)		48.4	22.45
废弃污泥/结晶处理费 (人民币,万/年)		1413.3	655.5
方案二污泥处理费约每年节省757.8万 (此处污泥处理费单价以一般固废：800RMB/ton计算)			
方案二的操作成本与废弃污泥/结晶处理费总共约每年节省850.8万			

比较基准

- 水量: 20000 CMD
- COD: 由 200mg/L 去除到 50 mg/L

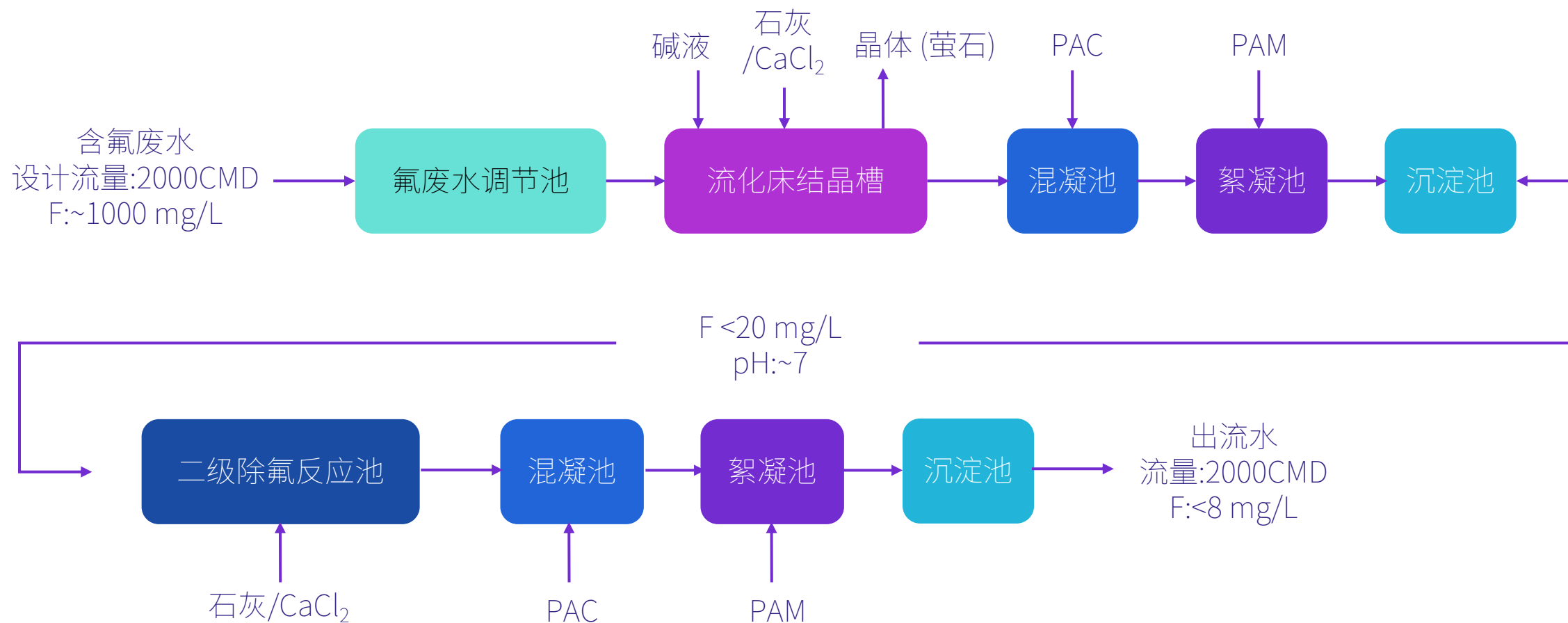
流化床芬顿实绩

实绩	产业
山西大同某新区污水厂	医药化工园区
浙江临海医药化工园区某污水处理厂	
合肥循环经济示范园某污水处理厂	化学工业园区
江苏南通海门化工园区某污水厂	
江西永新皮革产业园区某污水厂	皮革业
山东某纸业废水处理项目	浆纸业

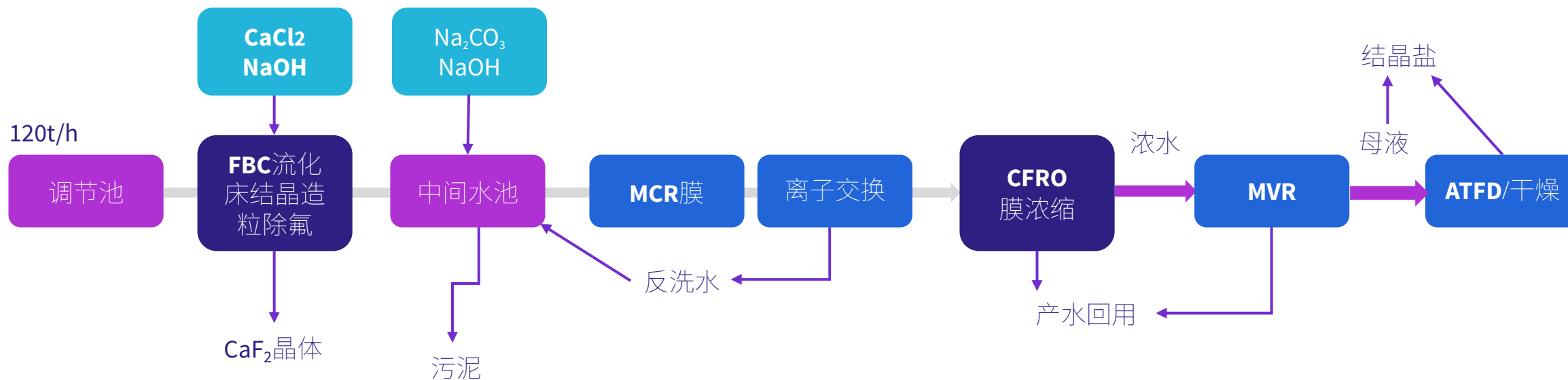


1.2 FBC流化床结晶除氟

光伏产业含氟废水 流化床结晶工艺路线（除氟产生萤石）



半导体产业含氟废水工艺流程



工艺描述：采用流化床结晶氯化钙除氟，无需添加混凝絮凝剂， CaF_2 晶体可当副产物；除钙环节采用MCR一体化膜软化除硬系统，占地面积少，不添加PAM；离子交换系统完全去除残留的金属离子及钙离子；CFRO膜浓缩能够将NaCl浓缩至18%,大大减少MVR的处理量。

整套工艺设计工艺流程短，污泥量少，无复杂沉淀池，土建量少，整体造价及能耗低

FBC产生的氟化钙晶体

我国萤石储量居世界第二，目前已探明储量约4200万吨，
但仅够开采7~10年。2018年成为纯进口国，已列入国家战略资源。



光伏污泥



流化床结晶槽内刚排出的 CaF_2 晶体



自然沥干后的 CaF_2 晶体

制备的氟化钙为晶体形式，微观结构与天然萤石矿相同，
自然沥干后含水率 $<10\%$ ，节省了后续运输烘干的成本。

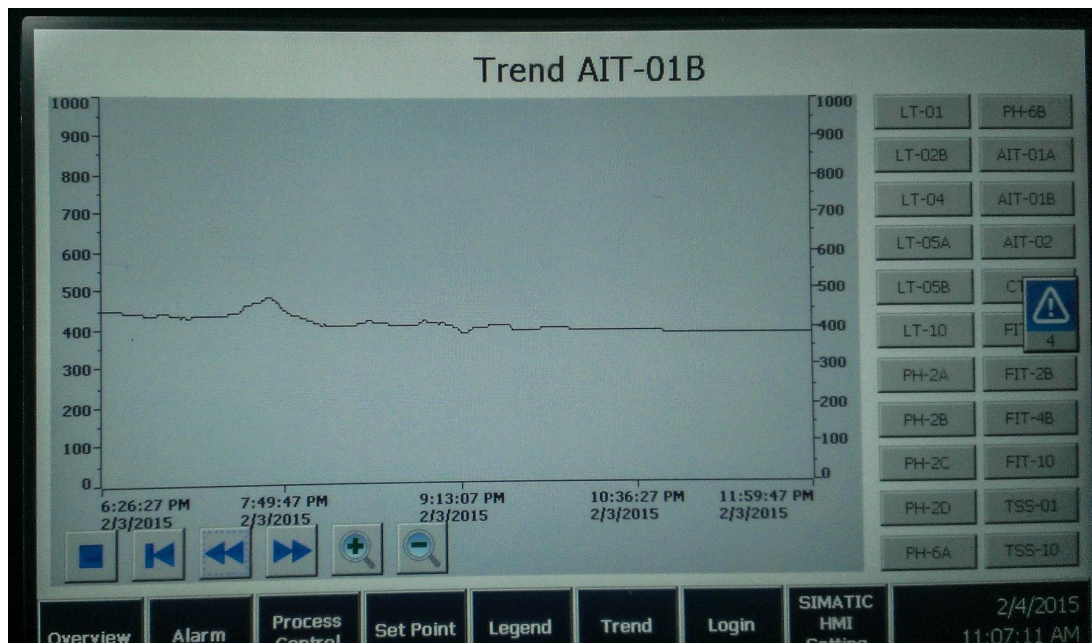
FBC含氟废水案例-半导体

客户类别(去除污染物)	结晶槽大小	处理水量	进出流浓度
半导体 (F-)(新加坡美光)	51 m ³ , 2.7m(D)x9m(H)x2	1680 m ³ /d	500 mg/L to <15mg/L
半导体 (F-)(新加坡美光)	46m ³ , 2.7m(D)x8m(H)x2	2280 m ³ /d	350 mg/L to <15mg/L

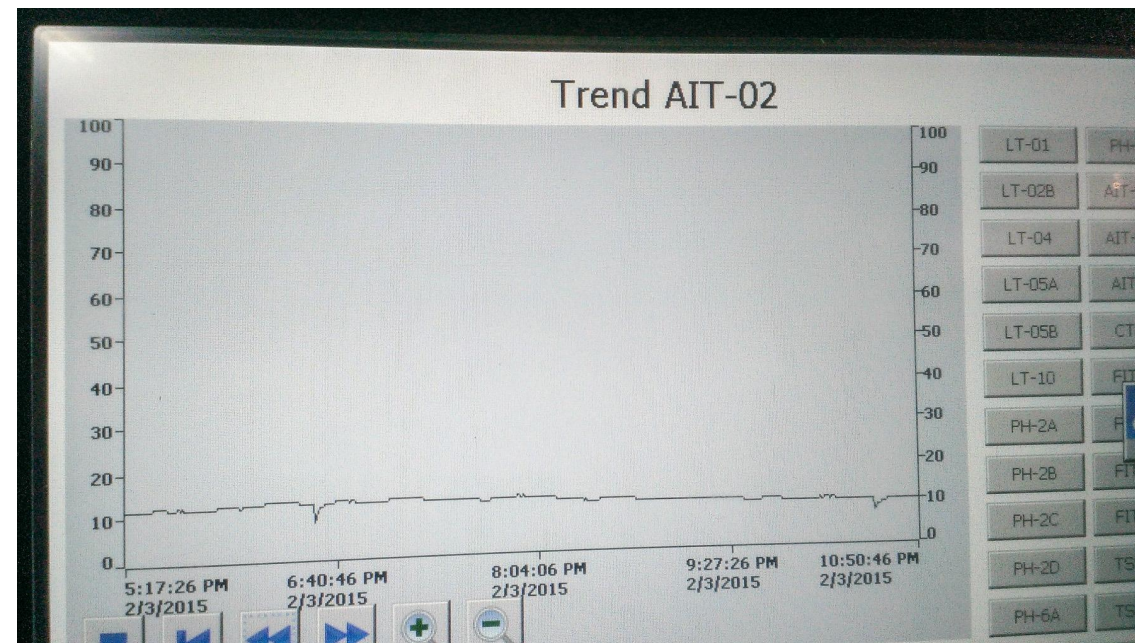
4套流体化床结晶塔（FBC）、中间水池、混凝沉淀池、晶体储存池、pH 调节池、药剂储槽等总占地约 150m*75m，但中间水池、沉淀池可用既有。



FBC含氟废水案例



美光10W厂含氟废水进水氟离子浓度范围
F⁻ : 400-500 mg/L

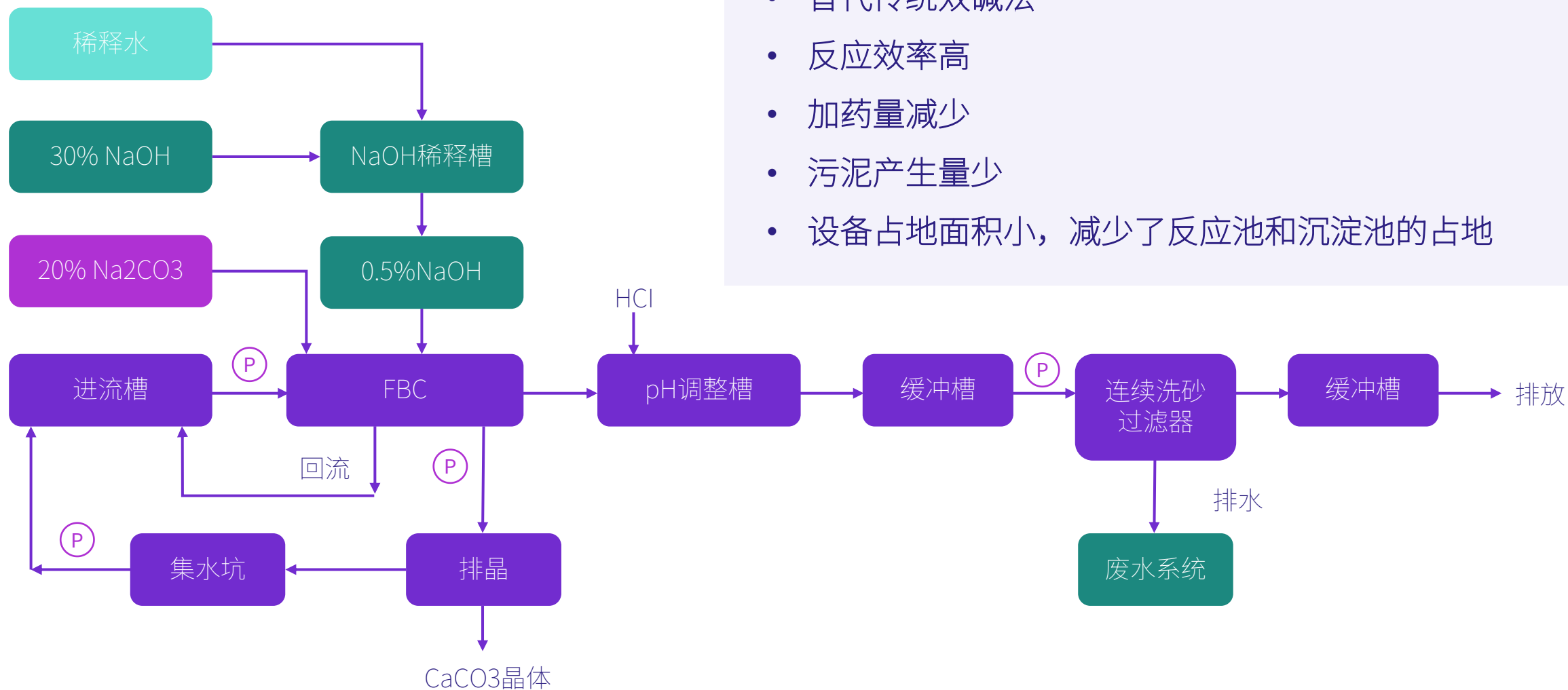


美光10W厂含氟废水经过FBC处理后氟离子
浓度F⁻ 9-12 mg/l

FBC含氟废水处理案例-光伏



软化除硬工艺流程



- 替代传统双碱法
- 反应效率高
- 加药量减少
- 污泥产生量少
- 设备占地面积小，减少了反应池和沉淀池的占地

台积电（TSMC）废水处理回收

挑战：

- 大水量，低生物负荷，需要高去除率以满足回用标准 (TOC, NH₄, NO₃, 尿素)
- 可用占地面积有限

Gradient 解决方案：

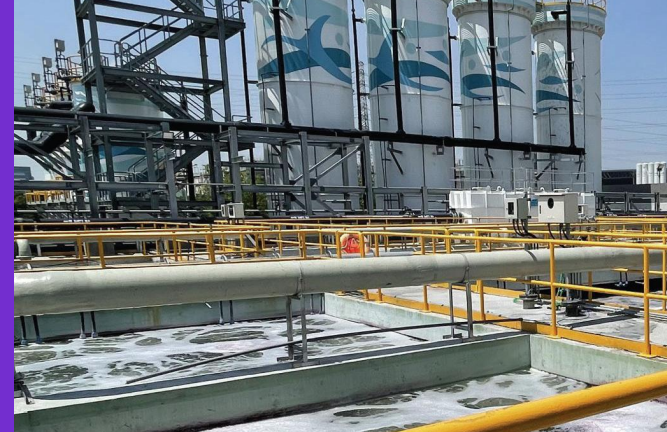
- 用于硬度和磷酸盐去除，最大限度减少污泥产生量和设备占地面积

满足客户目标：

整体回收率超过65%，
采用多组分处理系统

紧凑、创新的解决方案适
应可用空间

达成了水资源节约
的目标



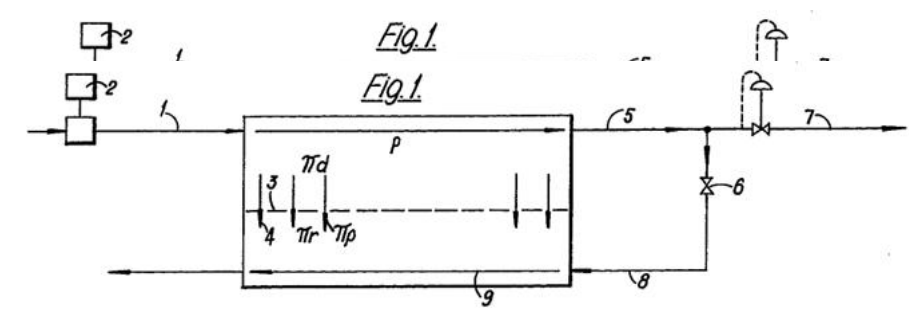
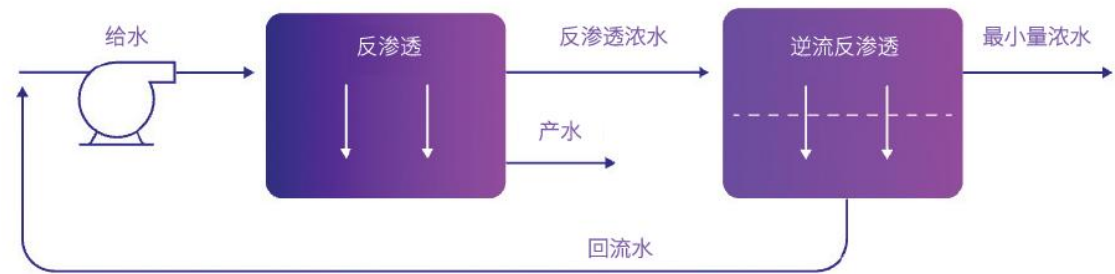
地区
台湾

应用
废水回用

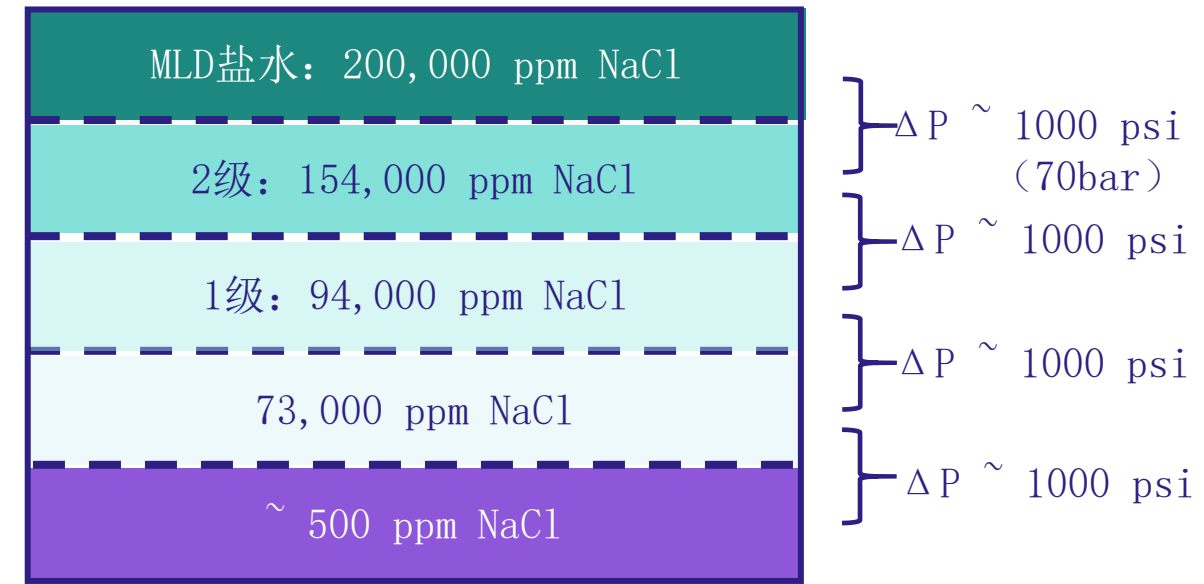
处理规模
35,000 m³/天

2.CFRO逆流反渗透技术

核心技术：CFRO逆流反渗透技术



逆流反渗透

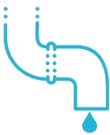


核心技术：CFRO逆流反渗透技术

解决方案概述

- 膜元件 采用成熟的高性能反渗透/纳滤膜技术卷制而成，成本与常规卷式膜类似
- 浓缩终点 氯化钠浓缩终点可达TDS 21万，硫酸钠可达TDS 27万以上
- 运行成本 吨水7度电
- 投资成本 较竞争工艺（HPRO、ED、蒸发浓缩）降低30%以上
- 节能减排 降低末端蒸发结晶设备或双极膜投资规模及运营成本30%以上

	超高压反渗透	ED	蒸发器降膜浓缩	CFRO
处理能力（TDS）	苦咸水，海水	苦咸水，超高盐度的水	苦咸水，超高盐度的水	苦咸水，超高盐度的水
浓缩终点以NaCl计TDS (mg/L)	<130,000	<210,000	<260,000	<210,000
资本支出（t/h）	≥11万元	≥15万元	≥30万元	<10万元
运维复杂程度	超高压，安全隐患	人工拆洗频繁，易损伤	高温运行	常温中压
能耗（吨水/电耗）	10KWH/T	20KWH/t	35KWH/T	7KWH/T



实现高效生产

在更低的压力和能耗条件下，提取更多淡水、回收高浓度宝贵资源，同时减少废物处理，从而有效降低总用水成本。



降低资本成本和运营成本

可处理高达盐分饱和限度（总溶解固体浓度达**260,000**毫克/升**NaCl**）的浓盐水，回收率高达**99%**。



提高系统可用性

RO INFINITY系统具有智能调节功能，能够适应不同的进水和运行条件，承受高度变化的进水质量，并且比传统系统更少发生结垢和污堵。



CFRO案例：沙特SAWACO

项目难点

- 增加淡水产量以满足需求
- 无法扩大海水入口或废水出口

驱动因素

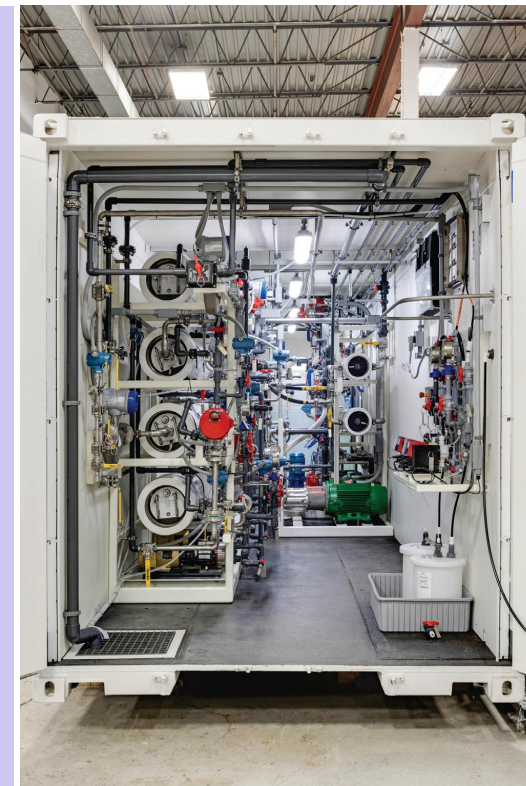
- 新建海水入口的建造成本太高
- 性价比最高的方式是部署一套附加的逆流反渗透系统，以便从海水反渗透盐水废水中额外回收50%的淡水

解决方案

- 中试证实，经过超过12个月连续运行之后，在 $< 7 \text{ kWh/m}^3$ 产水条件下，**整体系统回收率达到80%**，且系统正常运行时间达到99.8%，已经扩展至9000m³/天
- 逆流反渗透技术满足水质要求、运营支出要求和总用水成本要求
- 逆流反渗透技术增加了工厂产量，且无需建造新的入口或排放口基础设施

项目概览

- | | |
|---------|------------------------|
| • 终端用户: | SAWACO海水淡化厂 |
| • 行业: | 海水淡化 |
| • 地点: | 沙特阿拉伯吉达 |
| • 应用: | 高回收率海水反渗透 |
| • 给水: | 海水反渗透浓水 |
| • 工厂产能: | 9000 m ³ /天 |
| • 技术: | 二级逆流反渗透 |
| • 开始日期: | 2019年12月 |
| • 合同模式: | 设计建造 (DB) |



CFRO案例：新加坡美光Micron

挑战

- 满足新加坡公用事业局（PUB）的排放标准，污泥处理费高
- 废水具有高变异性（高悬浮固体、有机物、硅和氟化物），阻碍了常规处理方法的应用。
- 污水处理厂（WWTP）设计和建设方面存在限制。

驱动因素

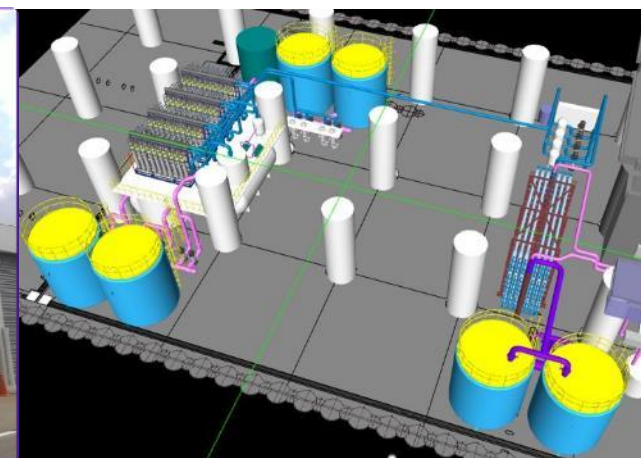
- 客户将回收大部分废水，并在其制造设施中将其重复使用作为 LSR（制程用纯水）的补充，而不是为满足其扩建设施需求去购买相同数量的NEWater。
- 寻找能够实现客户期望的废水回收百分比的定制解决方案。
- 由于紧急的用水需求，存在紧迫的时间表（第一阶段：截至2022年7月底，WWTP截至2022年10月底）。

解决方案

- 提出采用FBC除氟，极大减少了污泥处置费用，采用CFRO处理 influent 废水，**整体回收率大于92%**
- 作为附加的价值主张，Gradient提供SmartOps作为集成数字平台，用于工厂性能优化、自动化、远程监测和控制。

项目概览

- | | |
|---------|-------------------------------|
| • 行业: | 半导体 |
| • 地点: | 新加坡 |
| • 应用: | 除氟、废水回收 厂区废气洗涤废水 |
| • 给水: | (高氟, 悬浮物, 硅, COD) |
| • 工厂产能: | 9,600 m ³ /day |
| • 技术: | FBC、CFRO and SmartOps Digital |
| • 开始日期: | 2022年12月 |
| • 合同模式: | 设计建设 (DB) |



CFRO案例：亨斯曼泰国



项目难点

- 来自染料制造厂的废水，入口TDS含量可变（6,000-12,000 mg/L）和COD含量中等（240 mg/L），需要零液体排放（ZLD）处理

驱动因素

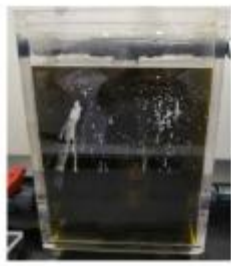
- 客户追求可持续和高性价比的零液体排放处理方案，因为此方案可高效处理具有可变水质的给水。相比于盐水最少化所用的热技术，逆流反渗透技术成本减少了50%

解决方案

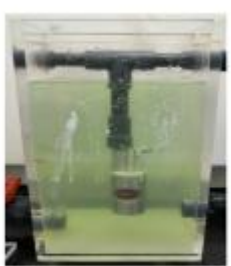
- 使用逆流反渗透技术进行盐水浓缩，给水回收率达到95%。产水也完全处于可再用的质量范围内，即TDS <300 mg/L
- 逆流反渗透系统产生的浓缩盐水中，TDS含量达200,000 mg/L，COD含量达8000 mg/L，而且盐水具有很鲜明的颜色（黑色），使用自由基氧化（FRO）技术做进一步处理，这种处理过程利用高级氧化技术和臭氧，清除废水流中的有机物和有色物质
- 最终将处理后的废水输送到盐水制备系统，以满足客户的要求

项目概览

- | | |
|---------|----------------------|
| • 终端用户: | 亨茨曼 |
| • 行业: | 化工 |
| • 地点: | 泰国 |
| • 应用: | 高级氧化工艺和盐水最少化以实现零液体排放 |
| • 给水: | 纺织品染料废水高彩色和有机物 |
| • 工厂产能: | 900 m³/天 |
| • 技术: | CFRO逆流反渗透&自由基氧化FRO |
| • 开始日期: | 2023年6月 |
| • 合同模式: | 设计建造（DB） |



0h

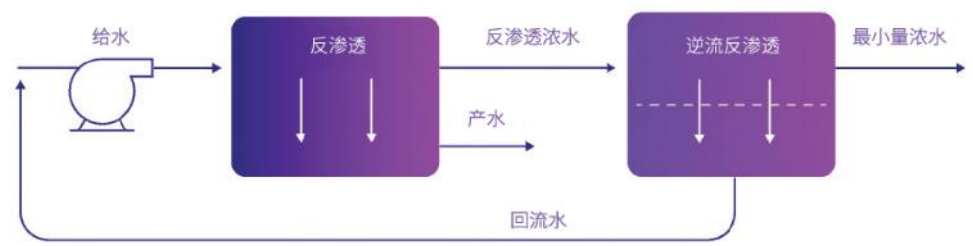


4h

CFRO案例：沧州某新材料公司

项目概览

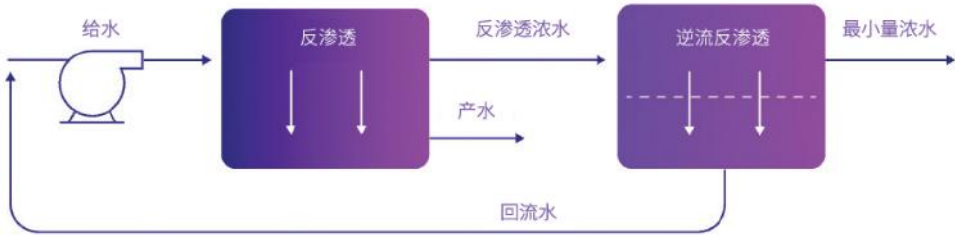
- 终端用户：沧州某新材料公司
- 行业：化工
- 地点：河北沧州
- 应用：硝酸钠高倍浓缩后去蒸发结晶
- 给水：生产工艺水
- 工厂产能：1050m³/天
- 技术：CFRO逆流反渗透
- 开始日期：2023年6月
- 合同模式：设计建造（DB）
- 浓缩终点：硝酸钠TDS 180000



CFRO案例：四川某环保科技有限公司

项目概览

- 终端用户：四川某环保科技有限公司
- 行业：油气田开发
- 地点：四川
- 应用：气田采出水减量化
- 给水：生产工艺水
- 工厂产能：1500m³/天
- 技术：CFRO逆流反渗透
- 开始日期：2024年8月
- 合同模式：设计建造（DB）
- 浓缩终点：TDS 150000



3. 公司简介

Gradient – 1st Unicorn in Water Industry

- 独角兽地位：水务行业中首个也是唯一一个估值达到20亿美元的私营公司
- 品牌曝光：戈润品牌宣传内容在纽约时代广场及纽约证券交易所展示
- 社会认可：对于社会各界对我们使命重要性的理解及其对地球现在与未来的影响表示感谢





WE ARE A DIFFERENT KIND OF WATER COMPANY

戈润是一家与众不同的水务公司

- 利用独家技术体系和行业领先的水处理解决方案，结合人工智能技术，有效应对全球最复杂的水处理挑战
- 拥有超过288项专利和顶尖的工程技术，在全球提供自动化水处理方案，帮助客户降低成本并优化环境影响

OUR MISSION

利用最先进的解决方案为全球各行业
节约、回收和净化水资源

动员全球最顶尖的团队，创造出一套专有技术体系，
集成行业领先的水处理技术，并结合人工智能技术，
解决全球最复杂的水处理问题。

戈润的发展历程

2013

作为麻省理工学院的分支机构在波士顿成立

2015

成功实现选择性化学萃取技术商业化，并在水价值链上建立一系列专有技术

2017

在中国和印度建立了首批国际化的工业废水处理厂

2019

在中东地区成功商业化逆流反渗透技术，并建成第一个项目

2021

与锂行业的SLB公司 and 市场扩展领域的Flowserve公司等各行业领域建立战略合作伙伴关系

2023

收购Advanced Watertek、Muscat Projects & Engineering (MPES)、AquaChem和H+E集团，大幅扩大解决方案组合和地理覆盖范围

2014

成为美国境内第一家处理和回收工业废水的载气萃取工厂

2016

作为一家端对端解决方案提供商，与第一家“财富100强”企业达成合作

2018

在新加坡成立地区总部和全球创新中心

2020

收购Sigma Water和CRS Water两家公司，进一步加深在亚洲和澳洲的影响力

2022

收购机器学习AI公司Synauta以及半导体水技术公司WaterPark Environmental，继续进行地域和技术扩张

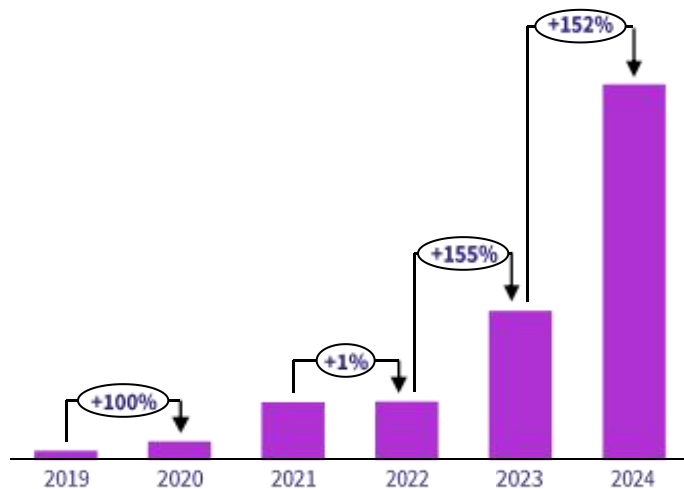
2024

收购意大利公司Hydrotech Engineering

全球实力，专注本地



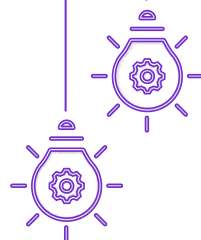
在20个国家和地区设立办事处，并在不断扩张



自2019年起，年复合增长率达100%

~ 288+

项已批准和待批准专利

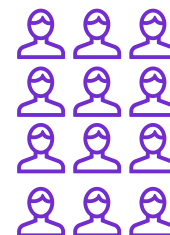


20 个行业奖项 20 个全球办事处

一家以技术为驱动的端到端
水处理解决方案公司，致力
于解决最紧迫的水资源挑战

1,200

名员工



2,000



座已落成水处理设施



服务于全球
最为重要的
行业

12 年创新历程

每天处理废水
85亿升

8.5B

6.5B 每天节约淡水
65亿升

每天减少的电力消
耗15亿千瓦时

1,500

行业奖项和行业认可



国际脱盐协会

最具创新力公司--2022



国际水务智库（GWI）全球水奖

年度水务公司杰出贡献奖—2024年

年度海水淡化公司--2023年

年度水技术公司--2022年

年度突破性技术公司--获奖者（Synauta）--2022年



Real Leaders生态创新奖

全球产生积极环境影响的公司中排名第7--2022年



卓越职场- 2022

80%的戈润员工表示这是理想的工作场所，而在其他全球性公司，持此观点的员工比例为53%



清洁技术集团

全球清洁技术公司100强--2023年

凭借顶尖的创新人才、技术和决心，我们必定能兑现“净零碳”的承诺

Forbes

福布斯

美国最佳创业雇主--2023年

美国企业最关注雇主声誉、员工满意度和企业成长。在2012年至2019年间成立且拥有至少50名员工的公司皆可视为创业公司



《时代》2024年度最佳发明



APAC Next Gen Tech 30

东盟Next Gen 30 奖项--2024



環境部

Ministry of Environment
Taiwan Water Sustainability Award

台湾环境部净水永续奖--2024



2025年爱迪生奖金奖

服务于全球重要行业

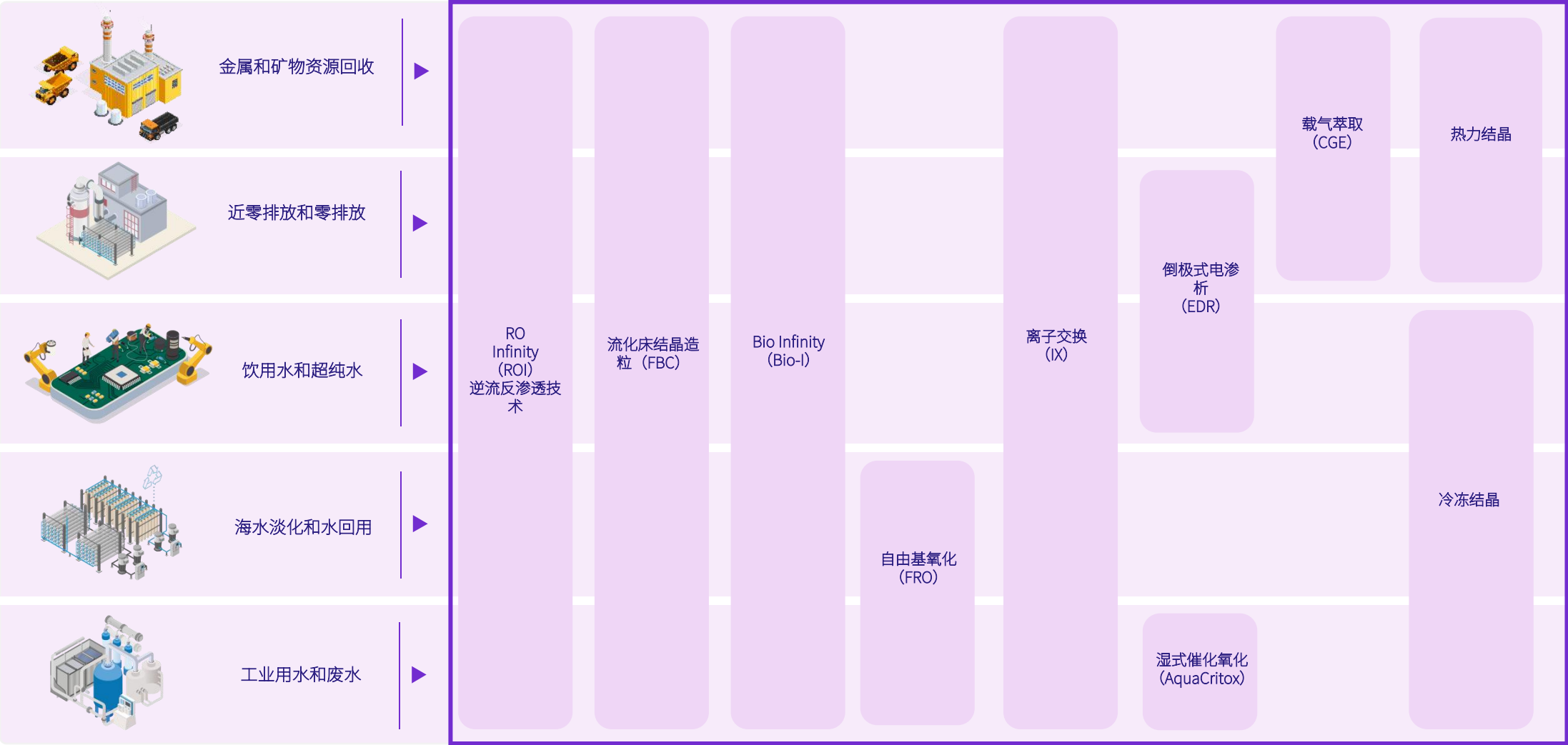
为全球重要行业中的各大品牌提供关键性水务运营服务

客户群体均为行业领导者，他们决定着世界的未来

戈润70%的客户属于财富100强企业



专业技术



核心优势



01

全球供应链优势

Gradiant与多家顶尖供应商（如Xylem GF+等）建立了战略合作关系，强化了其全球供应链的竞争力，确保了资源的高效配置和优质服务的持续提供。



03

国际化技术支持与本土化服务

Gradiant提供国际级的技术支持，并与本土服务及制造紧密结合，兼顾技术先进性与成本效益，满足不同市场的具体需求。



02

丰富的全球项目经验

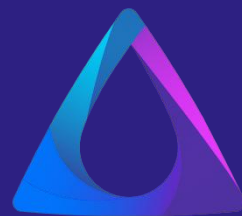
Gradiant在全球范围内成功实施了多个纯水和废水处理项目，并助力诸多国内领先企业成功出海，展示了其在水处理技术上的广泛应用和高效管理能力。



04

资金状况稳健

Gradiant拥有健康的资金状况，能够支持包括大型项目在内的各种业务拓展和技术投资，保障项目的顺利执行和长远发展。



gradient