

工业水处理

王智, 焦阳, 张子诺, 等. 高硅高盐光伏废水中氟硅深度净化与硬度控制工艺优化[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 126-131.

Wang Z, Jiao Y, Zhang Z N, et al. Optimization of advanced purification process for fluoride and silicon removal and hardness control in high-silicon and high-salt photovoltaic wastewater[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 126-131.

高硅高盐光伏废水中氟硅深度净化与硬度控制工艺优化

王智¹, 焦阳¹, 张子诺¹, 王辉^{2,3}, 徐志婧^{2,3,*}

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西西安 710075; 2. 西安理工大学生态环境与化工学院, 陕西西安 710048; 3. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室, 陕西西安 710048)

摘要 【目的】 光伏电池制造废水具有高氟、高盐、高硅的显著特征, 导致处理过程中存在药剂消耗量大、污泥产量高及出水硬度累积等突出问题, 制约了废水处理工艺的经济性与环保性, 亟需优化处理技术方案。【方法】 文章采用分质预处理与深度净化策略。首先以高浓母液为处理对象, 在 $n(\text{Ca}) : n(\text{F})$ 摩尔比为 1 : 1 的条件下对比不同钙源的处理效能; 基于钙源筛选结果, 构建“熟石灰预处理-两级混凝沉淀-化学软化”组合工艺, 利用 CaF_2 沉淀与聚合硅酸胶体的协同作用强化污染物去除。【结果】 钙源对比试验显示, 熟石灰除氟率高达 99.87%, 干污泥产率仅为 2.91 mg/mg, 较 CaCl_2 降低了约 51%, 主药剂成本低至 20.77 元/ m^3 , 综合优势显著。组合工艺运行结果表明, 末端化学软化单元可有效削减硬度, 使出水总硬度从约 1310.5 mg/L 降至 4.5 mg/L; 借助新生碳酸钙的共沉淀效应, 出水 F^- 质量浓度稳定在 6.3 mg/L, 全流程药剂成本仅为 14.30 元/t, 实现了氟、硅的深度去除与硬度控制。【结论】 该组合工艺通过参数优化与单元协同, 解决了光伏废水处理中的结垢问题, 在大幅减少药剂消耗和污泥产量的同时, 实现污染物深度削减, 为光伏废水的绿色治理提供了理论依据。

关键词 光伏废水; 氟硅协同去除; 污泥减量; 熟石灰; 硬度控制; 共沉淀

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0126-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.014

Optimization of Advanced Purification Process for Fluoride and Silicon Removal and Hardness Control in High-Silicon and High-Salt Photovoltaic Wastewater

Wang Zhi¹, Jiao Yang¹, Zhang Zinuo¹, Wang Hui^{2,3}, Xu Zhiqiang^{2,3,*}

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China;

2. School of Eco-Environmental & Chemical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract [Objective] Photovoltaic cell manufacturing wastewater exhibits distinct characteristics of high fluoride, high salt, and high silica content. This leads to significant challenges in treatment processes, including high chemical consumption, substantial sludge production, and cumulative effluent hardness. These issues compromise the economic and environmental sustainability of wastewater treatment process, necessitating optimized treatment strategies. [Methods] This paper employed a strategy combining quality-based pretreatment with advanced purification. High-concentration mother liquor was first treated under $n(\text{Ca}) : n(\text{F})$ molar ratio was 1 : 1 conditions to compare the treatment efficacy of different calcium sources. Based on the calcium source screening result, a combined process of "quicklime pretreatment-two-stage coagulation sedimentation-chemical softening" was established. The synergistic effect of

[收稿日期] 2025-12-15

[基金项目] 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司: 工业废水零排放技术研究(HQ-2024-P-TD-003)

[作者简介] 王智(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事废水处理技术研究等工作, E-mail: wangzhi@nwepdi.com。

[通信作者] 徐志婧(1969—), 女, 教授, 研究方向为污水处理与资源化利用, E-mail: 476539251@qq.com。

CaF₂ precipitation and polymeric silicate colloids was utilized to enhance pollutant removal. [**Results**] Calcium source comparison experiments demonstrated that quicklime achieved a fluoride removal rate of 99.87% with a dry sludge yield of only 2.91 mg/mg—approximately 51% lower than CaCl₂—and a primary chemical cost as low as 20.77 yuan/m³, showcasing significant comprehensive advantages. Operational result of the combined process indicated that the terminal chemical softening unit effectively reduces hardness, lowering total effluent hardness from approximately 1 310.5 mg/L to 4.5 mg/L. Leveraging the coprecipitation effect of newly formed calcium carbonate, effluent fluoride ion mass concentration stabilized at 6.3 mg/L. The total chemical cost for the entire process was only 14.30 yuan/t, achieving deep removal of fluoride and silica while controlling hardness. [**Conclusion**] Through parameter optimization and unit synergy, this combined process resolves scaling issues in photovoltaic wastewater treatment. It achieves deep pollutant reduction while substantially lowering chemical consumption and sludge production, providing a theoretical basis for the green management of photovoltaic wastewater.

Keywords photovoltaic wastewater; synergistic removal of fluoride and silicon; sludge reduction; hydrated lime; hardness control; co-sedimentation

太阳能光伏产业在推动绿色能源发展的同时,其制绒与刻蚀工序产生的高浓度含氟废水已成为制约行业可持续发展的关键问题。这类废水通常具有高氟、高盐及高硅特征,若处理不当将严重威胁水生态安全^[1-2]。《电池工业污染物排放标准》(GB 30484—2013)对氟化物的排放限值(质量浓度≤8 mg/L)提出了严苛要求。工程实践表明,针对此类复杂废水,采用高浓废水单独预处理与混合废水深度净化的分质处理策略,是降低处理负荷、保障系统稳定运行的关键路径^[3]。

当前,化学沉淀法(特别是钙盐沉淀)因经济高效、抗冲击负荷能力强,仍是光伏废水处理的主流工艺^[4-5]。然而,该工艺在实际应用中面临多重挑战:首先,现有研究多集中于单一污染物的去除,缺乏对高硅、高盐复杂基质中氟硅协同去除机理的深入解析;其次,传统工艺常面临污泥产量巨大(危废处置成本高)及出水硬度显著升高(易导致后续管路及膜系统严重结垢)的双重困境^[6-7]。如何在实现深度除氟的同时,最大限度地实现污泥减量并控制出水硬度,已成为行业亟待解决的技术瓶颈。

基于此,本文以某光伏电池制造企业的实际废水为对象,采用分质处置策略开展全流程优化研究。首先,选取高浓母液(W1)系统探究了熟石灰[Ca(OH)₂]、氯化钙(CaCl₂)2种不同钙源对除氟效能及污泥产率的影响,确立最佳减量化药剂;随后,针对综合混合废水(W2),构建了“Ca(OH)₂预处理-两级混凝沉淀-化学软化”组合工艺,重点考察氟硅协同深度去除机制及末端软化对残留氟的共沉淀深度净化作用。本文旨在通过构建深度净化技术

体系,为光伏行业废水的绿色高效治理提供理论依据与工程参考。

1 材料与方法

1.1 试验水样与材料

试验所用水样取自西安某光伏电池制造企业的废水处理系统。根据分质处置原则,选取2种代表性水样。

(1)高浓母液(W1):来自制绒与刻蚀工段,具有极高质量浓度的氟(F⁻质量浓度>4 700 mg/L)、高盐和高硅(总硅质量浓度>1 400 mg/L)特征。该水样用于钙源筛选与污泥减量特性研究。

(2)综合混合废水(W2):取自厂区污水处理站调节池,为多工段混合废水,水质相对稳定。该水样用于全流程工艺参数优化与达标验证。

W1和W2的主要水质指标如表1所示。

表1 试验水样主要水质指标

指标	W1	W2
F ⁻ /(mg·L ⁻¹)	4 718.7±136.0	1 345±24
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	208±32	310±28
化学需氧量(COD)/(mg·L ⁻¹)	450.3±15.0	206±12
总溶解固体(TDS)/(mg·L ⁻¹)	27 035±236	5 390±35
pH值	2.8±1.2	7.36±0.50
总硅/(mg·L ⁻¹)	1 442.7±56.0	256±23
总硬度/(mg·L ⁻¹)	60±13	0.5±0.2

所用试剂包括:Ca(OH)₂、CaCl₂和无水碳酸钠(NaCO₃),均为工业级(纯度>90%)。聚合氯化铝(PAC)与阴离子聚丙烯酰胺(PAM)分别配制成10%(质量分数)与0.1%(质量分数)的水溶液备用。

1.2 试验方法

1.2.1 钙源筛选与投加量优化试验

为探究不同钙源在高负荷废水中的除氟与产泥特性,使用 W1 进行批式试验。分别投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaCl_2 , 设定不同的 $n(\text{Ca}) : n(\text{F})$ 摩尔比(0.50 : 1.00、0.75 : 1.00、1.00 : 1.00、1.25 : 1.00、1.50 : 1.00、2.00 : 1.00), 通过调整 pH 和使用 PAC/PAM 辅助混凝沉淀, 测定不同投加量对氟去除效率和污泥产量的影响。

试验步骤如下。(1) 反应阶段: 向 200 mL 水样中投加计算量的钙盐 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCl_2], 以 300 r/min 快速搅拌反应 10 min, 确保充分反应。(2) 混凝阶段: 反应结束后, 使用质量分数为 10% 的 HCl 调节 pH 值至 8.5~9.0; 投加 0.6 mL PAC 溶液, 300 r/min 快搅 1 min, 继而投加 1.0 mL PAM 溶液, 降低转速至 60 r/min 慢搅 15 min, 促进絮体生长。(3) 分离与测定: 静置沉降 2 h 后, 取上清液测定残余 F^- 含量。沉淀底泥经收集后在 105 °C 下烘干至恒重, 用于计算干污泥产率。

1.2.2 组合工艺全流程优化试验

基于 1.2.1 节确定的最优钙源, 构建“ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 预处理-两级混凝沉淀-化学软化”组合工艺, 考察其对 W2 的深度净化效果。

(1) 一级处理[($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 预处理]: 调节 pH 并按最优比投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 快速反应 10 min。调节 pH 值至 8.7, 投加 PAC(0.6 mL) 和 PAM(1.0 mL), 进行混凝沉淀(快搅 1 min, 慢搅 15 min)。静置 30 min 后取上清液。

(2) 二级处理(两级混凝沉淀, 强化除氟): 取一级处理出水, 调节 pH 值至 7.5~8.5, 重复上述 PAC/PAM 混凝沉淀步骤(投加 0.6 mL PAC 溶液, 300 r/min 快搅 1 min, 继而投加 1.0 mL PAM 溶液, 降低转速至 60 r/min 慢搅 15 min)。静置 30 min 后测定上清液 F^- 及总硅含量。

(3) 化学软化: 取二级处理出水, 投加适量碳酸钠(质量浓度约为 2.0 g/L), 调节 pH 值至 8.5~9.0。配合投加微量 PAC(0.3 mL) 和 PAM(0.5 mL) 进行强化软化。反应沉淀后, 测定最终出水的 F^- 、总硅及总硬度。

试验全过程记录各阶段药剂消耗与污泥产生量, 以评估系统的经济性与环境归趋。

1.3 分析方法与计算

水质指标测定参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)。其中, F^- 采用《水溶性化工品中杂质氟离子的测定 离子色谱法》(GB/T 35925—2018) 测定; 总硅采用硅钼蓝分光光度法测定; COD、TDS、 SO_4^{2-} 及总硬度(乙二胺四乙酸滴定法) 等常规指标均采用标准方法测定。

干污泥产率反映了去除单位氟负荷所产生的固废量, 计算如式(1)。

$$Y_{\text{sludge}} = \frac{m}{V(C_0 - C_e)} \quad (1)$$

其中: Y_{sludge} ——干污泥产率, mg/mg;

m ——干污泥总质量, mg;

V ——水样体积, L;

C_0 、 C_e ——分别为处理前、后 F^- 质量浓度, mg/L。

2 结果与讨论

2.1 高氟废水基质特征与处理挑战

如表 1 所示, W1 呈现出典型的“三高”特征: 极高的氟质量浓度(约为 4.7 g/L)、高盐度(TDS 质量浓度 $> 2.7 \times 10^4$ mg/L) 及高硅(质量浓度 > 1400 mg/L)。这种强酸性高离子强度基质给处理带来了一定的困难。高盐环境产生的“盐效应”可能增加 CaF_2 的表观溶解度, 削弱沉淀效果; 另外, 共存的高浓度硅酸盐在 pH 回调过程中极易形成胶体, 虽有助于网捕扫卷, 但可能包裹 CaF_2 晶核, 阻碍晶体生长, 导致泥水分离困难。因此, 精确调控钙盐投加策略以平衡除氟效能、污泥产量与药剂成本, 是实现该类废水低碳高效治理的关键。

2.2 钙源种类与投加量的优化策略

2.2.1 除氟效能与机理分析

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCl_2 在不同摩尔比下的除氟行为呈现相似规律(图 1), 即随着摩尔比的增加, F^- 去除率均呈现先快速上升后略有回落的非线性特征。在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 体系中, 在 $n(\text{Ca}) : n(\text{F}) = 1.00 : 1.00$ 时达到最佳除氟点, 残余 F^- 质量浓度降至 6.13 mg/L(去除率为 99.87%); 在 CaCl_2 体系, 最佳投加比为 1.25 : 1.00, 此时残余 F^- 质量浓度为 8.14 mg/L。

但过量投加钙盐并未进一步提升去除率, 反而导致出水 F^- 含量反弹。这主要是同离子效应与

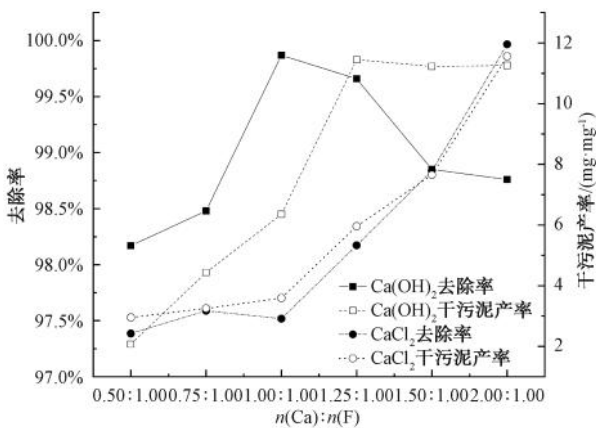


图1 Ca(OH)₂ 和 CaCl₂ 的除氟效果与干污泥产率
Fig. 1 Fluoride Removal Efficiency and Dry Sludge Yield of Ca(OH)₂ and CaCl₂

pH/盐效应相互竞争、相互制约的结果。增加 Ca²⁺ 质量浓度理论上能利用同离子效应促使沉淀溶解平衡 (CaF₂ ⇌ Ca²⁺ + 2F⁻) 向左移动,从而降低残余 F⁻ 质量浓度,但过量 Ca(OH)₂ 投加显著提高了溶液的 pH 和离子强度,导致 CaF₂ 的溶度积常数 K_{sp} 发生改变并诱发沉淀复溶^[5,7]。因此,必须在促进沉淀与抑制复溶之间找到最佳平衡点。

表2 全流程分步处理后的水质净化效能

Tab. 2 Water Purification Performance of the Stepwise Treatment Process

项目	pH 值	F ⁻ 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	F ⁻ 阶段 平均去除率	总硅质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	总硬度/ (mg·L ⁻¹)	备注
W2	7.4±0.2	1 345.0	—	256.0	0.5	初始高负荷
Ca(OH) ₂ 预处理	8.7±0.1	25.0	98.14%	29.8	1 294.8	主去除段,引入硬度
两级混凝沉淀	7.5±0.2	12.5	50.00%	21.7	1 310.5	深度除氟,硬度累积
化学软化	8.5±0.1	6.3	49.60%	13.5	4.5	除硬与深度达标

2.3.1 氟硅协同去除与高硬度引入

一级处理[Ca(OH)₂ 预处理]阶段,在 n(Ca) : n(F) = 1.00 : 1.00 条件下,利用 Ca(OH)₂ 的高碱度与高钙含量,F⁻ 质量浓度骤降至 25.0 mg/L(阶段去除率为 98.14%),同时总硅去除率高达 88.36%。这种高效的同步脱除机理主要为 Ca²⁺ 与 SiO₃²⁻ 直接反应生成 CaCO₃ 沉淀。此外,原位生成的 CaF₂ 晶体与聚合硅酸胶体发生强烈的吸附架桥与共沉淀作用,也对污染物的去除起到了一定作用^[10]。这种协同效应不仅大幅削减了氟负荷,也有效降低了硅对后续膜处理系统的结垢风险。

随后的两级 PAC-PAM 深度混凝,虽然将 F⁻ 质量浓度进一步降至 12.5 mg/L,并将总硅质量浓度

2.2.2 污泥产率与药剂成本的综合评估

由图 1 可知,在同等投加比下,CaCl₂ 体系的产泥量显著高于 Ca(OH)₂ 体系。在各自的最佳除氟点,Ca(OH)₂ 产生的干污泥质量分数仅为 2.91 mg/mg,比 CaCl₂(5.96 mg/mg)降低了约 51%。机理分析表明,CaCl₂ 引入的大量 Cl⁻ 破坏了双电层结构,形成的絮体结构疏松、结合水含量高;而 Ca(OH)₂ 反应生成的沉淀晶型更紧密,沉降性能更优^[8-9]。

经济性分析显示,处理 1 m³ 高氟废水,Ca(OH)₂ 体系的主药剂(钙源)成本仅为 20.77 元,而 CaCl₂ 体系高达 66.46 元。采用 Ca(OH)₂ 可节省约 68.7% 的核心药剂费用(即成本仅约为 CaCl₂ 体系的 31.3%)。综合考量除氟效能(>99%)、污泥减量优势(产率降低约 51%)及显著的运行成本效益,Ca(OH)₂ 展现出极高的工程应用价值,因此被确定为后续组合工艺的首选钙源。

2.3 混合废水的分步深度净化与硬度控制

针对成分复杂的混合废水 W2,构建了“Ca(OH)₂ 预处理-两级混凝沉淀-化学软化”的全流程工艺。各阶段的处理效果如表 2 所示。

降至 21.7 mg/L,但也带来了副作用——出水总硬度维持在 1 310.5 mg/L 的高位(较一级出水略有升高,归因于 pH 降低,微量钙盐复溶)。这种高硬度出水若直接排放或回用,将在输送管路及后续生化/膜系统中引发严重的矿物结垢风险,威胁系统长期稳定运行。

2.3.2 深度软化与氟的共沉淀效应

为解决上述硬度问题,本文引入了碳酸钠化学软化单元(表 2)。结果表明,该单元实现了“除硬”与“深度净化”的双重功效。投加碳酸钠后,出水总硬度从 1 310.5 mg/L 骤降至 4.5 mg/L,去除率高达约 99.7%,彻底消除了结垢隐患。另外,两级出水 F⁻ 质量浓度(12.5 mg/L)尚未完全达到严格排放标

准(≤ 8 mg/L)。但在软化过程中,新生 CaCO_3 沉淀通过晶格掺杂或表面吸附作用,对残留 F^- 起到了良好的固化作用(共沉淀效应),使最终出水 F^- 质量浓度稳定在 6.3 mg/L,实现了氟达标的双重保障。对于单一的钙盐沉淀法来说,通常无法一次性达到排放标准,因此研究人员常采用多种工艺的组合来提高氟化物的去除率,为了达到排放要求,通常需进行二次甚至多次的废水处理过程。崔兵等^[11]使用一级钙盐联合二级混凝才可以使得初始 F^- 质量浓度从 1 705 mg/L 降低至 5 mg/L 以下。瞿露等^[6]使用工业级 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在 $n(\text{Ca}) : n(\text{F}) = 1 : 1$, 反应 pH 值为 6.5~7.0 的配比投加条件下,含氟废水除氟后的干污泥产率约为 3.59 g/g。肖雪峰等^[1]使用二级混凝沉淀工艺,在 $n(\text{Ca}) : n(\text{F}) = 2 : 1$, 反应 pH 值为 8~9 的条件下才使得初始 F^- 质量浓度从 7.456 g/L 降低至 9.3 mg/L。

2.3.3 全流程经济与环境效益分析

综合评估该组合工艺,其在实现氟、硅及硬度全面达标的同时,展现出显著的经济与环境优势。其中,深度软化单元引入的碳酸钠成本约为 5.00 元/t,其余成本主要涵盖前端 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 预处理及两级混凝所消耗的钙源、混凝剂(PAC)与絮凝剂(PAM)等。对于本文中的 1 t 光伏废水,在实现 F^- 质量浓度从 1 345.0 mg/L 降至 6.3 mg/L、总硅质量浓度从 256.0 mg/L 降至 13.5 mg/L,并将总硬度从 0.5 mg/L 控制至 4.5 mg/L 的处理目标下,该组合工艺的全流程药剂成本约为 14.30 元/t。尽管总成本较单一除氟工艺(7~9 元/t)有所增加,但考虑到该工艺解决了高硬度结垢问题,避免了后续膜组件频繁更换及管道酸洗的巨额运维费用,其综合性价比依然显著。另外,由于采用了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为主钙源,全流程干污泥总产率控制在 6.45 mg/mg 左右,有效降低了危废处置压力。

3 结论

(1) 针对高氟、高盐及高硅母液, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCl_2 的除氟效能均受同离子效应与 pH 复溶机制的共同制约。对比研究表明, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在 $n(\text{Ca}) : n(\text{F}) = 1.00 : 1.00$ 时实现了除氟效能与经济性的最佳平衡(去除率为 99.87%),且相比 CaCl_2 体系,其主药剂成本节省约 68.7%,干污泥产率降低约 51%。因此, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被确立为该类废水预处理及

污泥减量化的首选钙源。

(2) 针对综合混合废水,构建了“ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 预处理-两级混凝沉淀-化学软化”的组合工艺。研究发现,该工艺利用 CaF_2 沉淀与聚合硅酸胶体的协同作用,实现了氟、硅的深度去除;特别是末端引入的化学软化单元,在将出水总硬度从约 1 310.5 mg/L 削减至 4.5 mg/L 的同时,利用新生 CaCO_3 的共沉淀效应,使最终出水 F^- 质量浓度稳定在 6.3 mg/L,优于《电池工业污染物排放标准》(GB 30484—2013)限值。

(3) 该组合工艺的全流程药剂成本约为 14.30 元/t,干污泥总产率控制在 6.45 mg/mg 左右。尽管深度软化增加了部分运行成本,但其解决了传统钙法工艺面临的高硬度结垢与大污泥产量等行业痛点,在保障水质安全达标的同时,显著降低了后续系统的运维风险,具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 肖雪峰,孙永军,梅凯,等. 钙沉淀混凝处理太阳能电池生产高氟废水研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(5): 30-32.
Xiao X F, Sun Y J, Mei K, et al. Study on the treatment of solar cell produced wastewater containing high fluoride by calcium coagulation-sedimentation[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(5): 30-32.
- [2] 余琴芳,镇祥华,邹磊,等. 含氟工业废水深度处理工艺方案[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 140-146.
Yu Q F, Zhen X H, Zou L, et al. Solutions of advanced treatment process for industrial fluoride wastewater[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(5): 140-146.
- [3] 张小东,赵飞燕,王永旺,等. 废水除氟技术研究现状[J]. 无机盐工业, 2019, 51(12): 6-9, 19.
Zhang X D, Zhao F Y, Wang Y W, et al. Research status of wastewater defluoridation technology[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, 51(12): 6-9, 19.
- [4] 王小兵,曾佳玮,汤钟. 高出水标准要求下高含氟工业废水处理实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 83-89.
Wang X B, Zeng J W, Tang Z. Practice of high fluorine industrial wastewater treatment under the requirement of high effluent standard[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 83-89.
- [5] 石智如,武海霞,吴德勇,等. 化学-混凝沉淀法处理酸性高浓度含氟光伏废水[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2024, 46(3): 338-344.
Shi Z R, Wu H X, Wu D Y, et al. Treatment of acidic and highly concentrated fluorine-containing photovoltaic wastewater by chemical coagulation-precipitation method[J]. Journal of

- Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2024, 46(3): 338-344.
- [6] 瞿露, 付宏祥, 汪诚文, 等. 钙盐法处理太阳能电池生产含氟废水的污泥产量及成分研究[J]. 环境工程, 2014, 32(1): 147-152.
- Qu L, Fu H X, Wang C W, et al. Research on production and composition of sludge produced by the treatment of solar cell wastewater containing fluoride using calcium salt method[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(1): 147-152.
- [7] 赵凯, 孔秀琴, 邢春霞, 等. 聚环氧琥珀酸(PESA)对高硬度废水生物处理系统的作用[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 121-125.
- Zhao K, Kong X Q, Xing C X, et al. Performance of polyepoxysuccinic acid(PESA) in the biological treatment of high hardness wastewater [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2013, 35(3): 121-125.
- [8] Pulgar F, Ayala L, Jeldres M, et al. Lime/sodium carbonate treated seawater to improve flocculation and sedimentation of clay-based tailings[J]. Polymers, 2021, 13(23): 4108.
- [9] Chialvo A A, Simonson J M. The effect of salt concentration on the structure of water in CaCl₂ aqueous solutions[J]. Journal of Molecular Liquids, 2004, 112(1/2): 99-105. DOI: 10.1016/j.molliq.2003.11.001.
- [10] Shi Y X, Chen Z Q, Li Q, et al. Adsorption behavior of SiO₂ coatings on CaF₂ crystal planes: Molecular dynamics simulation and preparation [J]. Materials Today Communications, 2023, 36: 106510. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106510.
- [11] 崔兵, 金怡, 杨泽坤. 钙盐-混凝法处理高氟废水的实验研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(6): 150-155.
- Cui B, Jin Y, Yang Z K. Research on the treatment of high fluoride wastewater by calcium salt-coagulation method [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(6): 150-155.

(上接第 115 页)

- carbonization method and high-value utilization of the derived carbonization products [J]. Technology of Water Treatment, 2025, 51(2): 61-67.
- [11] 许劲, 徐军, 吕秋颖, 等. 水热碳化技术用于污泥处理处置前景分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 54-59.
- Xu J, Xu J, Lü Q Y, et al. Perspectives on hydrothermal carbonization technology for municipal sludge treatment and disposal[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 54-59.
- [12] 马文博. 污泥低碳化燃料化关键技术研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(2): 8-10.
- Ma W B. Research on key technologies of low temperature carbonization fuel sludge [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(2): 8-10.
- [13] 牟晋铭, 耿晓洒. 上海典型合流制排水系统溢流污染控制策略[J]. 净水技术, 2024, 43(10): 154-159.
- Mou J M, Geng X S. Countermeasures of overflow pollution control for typical combined drainage system in Shanghai [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(10): 154-159.
- [14] 王君, 陈娴, 桂丕, 等. 污泥炭化温度和时间对重金属形态及作物累积的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(5): 54-60.
- Wang J, Chen X, Gui P, et al. Effects of pyrolysis temperature and time on the speciation and bioaccumulation of heavy metals derived from sludge [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(5): 54-60.