

## 技术进展

# 含氟污泥提纯及其资源化处理技术研究进展

邓奥文, 殷进\*, 张奎, 贾宝龙, 陆玲钰, 钱小青  
(扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

**摘要:** 综述了含氟污泥的来源、理化性质和危险特性, 以及近年来的含氟污泥提纯工艺与资源化利用现状。比较分析了含氟污泥酸浸纯化法、复合纯化法及浮选纯化法之间各自的优缺点及技术进展现状, 讨论了含氟污泥资源化处理利用技术发展趋势, 以为含氟污泥资源化处理处置提供参考。

**关键词:** 含氟污泥; 浮选提纯; 污泥处置; 废弃物资源化利用; 危险特性

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0020-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.004

## Research progress on purification and resource utilization technology of fluorine-containing sludge

DENG Ao-wen, YIN Jin\*, ZHANG Kui, JIA Bao-long, LU Ling-yu, QIAN Xiao-qing  
(College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** This paper reviews the sources of fluorine-containing sludge, its physicochemical properties and hazardous characteristics, as well as the current status of purification processes and resource utilization of fluorine-containing sludge in recent years. The advantages and disadvantages as well as the current status of technical progress among the acid leaching purification method, composite purification method and flotation purification method of fluorine-containing sludge were compared and analyzed. The development trend of the resource treatment and utilization technology of fluorine-containing sludge was discussed, with the aim of providing a reference for the resource treatment and disposal of fluorine-containing sludge.

**Key words:** fluorine-containing sludge; flotation purification; sludge disposal; waste resource utilization; hazardous characteristics

随着全球半导体、光伏、集成电路制造业等行业的快速崛起, 氢氟酸(HF)被大量使用, 由此产生出大量待处理的含氟污泥。据统计<sup>[1]</sup>, 仅有色金属冶炼行业每年会产生超过 1 000 万 t 高浓度含氟废水, 处理后产生的含氟污泥量可达 3.6 万 t。就含氟污泥而言, 现有常用的填埋、焚烧<sup>[2]</sup>等处置方式不仅会引起二次环境污染, 而且易造成氟资源浪费。因此, 探索以含氟污泥为代表的含氟固体废物资源化利用技术, 既可以缓解含氟固体废物处理过程中带来的环境风险, 又可以解决氟资源短缺的问题。

### 1 含氟污泥的来源、特质及其危险特性

含氟污泥主要来源于氟化工、半导体、光伏、农药等行业对其产生的含氟废水的处理。含氟污泥

多为含氟废水经钙盐沉淀、絮凝脱水后产生, 主要成分为  $\text{CaF}_2$ 。含氟污泥通常为颗粒或团粒状聚集体, 如图 1 所示, 图 1(a) 为电子器件厂的含氟污泥 SEM 图, 图 1(b) 为光伏产业的含氟污泥 SEM 图<sup>[3]</sup>。不同行业的含氟污泥在形貌上存在一定的差异性, 其中, 氟化工污泥多为灰白色、质地坚硬

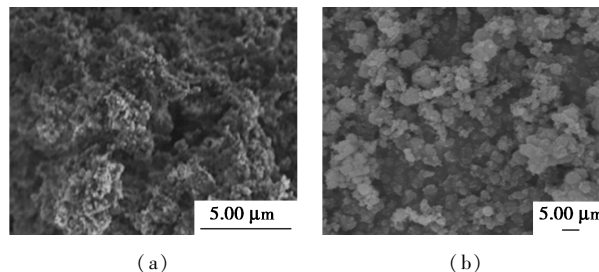


图 1 不同来源含氟污泥 SEM 图

收稿日期: 2025-07-18; 修回日期: 2026-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108401); 江苏省自然科学基金项目(BK20151313); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJXC24\_2267)

作者简介: 邓奥文(2001-), 男, 硕士生; 殷进(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固体废物资源化及污染治理, 通讯联系人, yinjin@yzu.edu.cn。

的大粒径颗粒;电子器件厂污泥以大尺度团聚体为主;光伏、半导体行业污泥因混入活性氧化铝、树脂等吸附剂,多为松散的小粒径团粒状聚集体,颜色偏灰色。

图 2 所示为某光伏厂的含氟污泥 XRD 图<sup>[4]</sup>,由图可知,含氟污泥中,  $\text{CaF}_2$  是其主要成分。不同来源的含氟污泥因原料、生产过程以及含氟废水处理工艺上的差异导致化学组成差别较大,表 1<sup>[3,5-7]</sup> 列举的是不同生产企业产出的含氟污泥的 XRF。

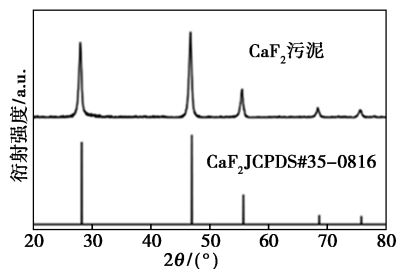


图 2 某光伏行业含氟污泥 XRD 图

表 1 不同行业含氟污泥的 XRF

污泥来源	CaO	SiO <sub>2</sub>	F	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
电子器件制造业	34.57	9.14	15.32	2.19	6.02	2.23	1.25	9.68
半导体企业	63.66	0.45	15.33	0.40	4.84	—	2.88	5.07
芯片制造业	45.72	7.61	10.16	0.30	17.90	0.32	2.41	—
光伏企业	34.58	9.15	15.32	2.23	6.03	2.43	1.23	9.58

另一方面,含氟污泥因行业不同,危险特性迥异,需要鉴定后确定是否属于危险废物或者一般固废。表 2 例举了几类不同行业产生的含氟污泥经浸出毒性判断其危险属性。一般而言,危废类污泥成分复杂、重金属超标、资源化难度高;一般固废类污泥  $\text{CaF}_2$  占比高,资源化潜力更大。

表 2 不同行业含氟污泥浸出危险特性

	浸出结果	是否属于危废
石墨烯厂含氟污泥 <sup>[8]</sup>	Mn、Cr 有浸出风险,但小于限值	一般固体废物
某电子厂含氟污泥 <sup>[9]</sup>	Cd、Cr、Ni、Zn、Ni 元素远超出限值	危险固体废物
某半导体企业含氟污泥 <sup>[5]</sup>	Ni、Cu、Zn 毒性浸出超标	危险固体废物

## 2 含氟污泥中 $\text{CaF}_2$ 纯化技术

萤石( $\text{CaF}_2$  含量一般在 70%~90%之间)被广

泛应用于国防、新能源、半导体、医疗等新兴领域中。有数据显示,预计到 2026 年,全球萤石矿产资源将短缺 60 万~80 万 t<sup>[10]</sup>。而含氟污泥中  $\text{CaF}_2$  含量平均在 50%左右,因此,通过含氟污泥提纯获取高纯度  $\text{CaF}_2$  以替代萤石应用于各工业领域势必会成为缓解萤石矿资源短缺问题的重要途径。目前, $\text{CaF}_2$  污泥提纯主要包括了酸浸纯化、复合纯化、浮选纯化等技术方向。

### 2.1 酸浸纯化法

酸浸纯化法主要通过酸的选择性溶解去除杂质以保留  $\text{CaF}_2$ ,常用的酸浸剂有盐酸(HCl)、氢氟酸(HF)、硝酸( $\text{HNO}_3$ )等,酸浸剂的选择往往是影响  $\text{CaF}_2$  提纯的关键因素。

含氟污泥中一般含有碳酸钙和金属氧化物等,选择盐酸作为酸浸剂最为常见。陈长铸<sup>[11]</sup>在盐酸浓度 1.5 mol/L、反应时间 2 h、液固比 4 mL/g、反应温度 30℃实验条件下,氟化钙的收率可达 82.74%。

相较 HCl 微溶  $\text{CaF}_2$  易降低目标产物收率, HF 提纯  $\text{CaF}_2$  更有效, HF 在破坏钙长石中硅酸盐-铝酸盐过氧桥键方面比 HCl 更有效。谢明等<sup>[12]</sup>研究表明, HF 在去除碳酸钙的同时,可以与游离出的钙离子继续生成氟化钙,进一步提升了氟化钙的含量。

Liao 等<sup>[13]</sup>针对氟化工含氟污泥通过选择不同酸作为酸浸体系进行对比试验,结果表明,硝酸比盐酸能提升 10%左右的纯度。硝酸作为强氧化酸,能够有效溶解含氟污泥中的金属氧化物,同时也能够氧化有机物和硫化物,以去除更多杂质。就单一酸浸法而言,其优缺点以及适用场景如表 3 所示。

表 3 不同酸浸的优缺点

酸种类	优点	缺点	适用场景
HCl	成本低	$\text{CaF}_2$ 溶解损失	含大量碳酸盐、金属氧化物
$\text{HNO}_3$	强氧化性,适用性广泛	成本高,易挥发	含大量金属氧化物
HF	去除硅酸盐,效果最优	毒性大,腐蚀性强	硅酸盐含量高的污泥

为了进一步加强除杂效果,提升  $\text{CaF}_2$  纯度,混酸也常被应用于含氟污泥的提纯中。陆美华等<sup>[14]</sup>针对微电子行业产生的含氟污泥,采用盐酸和氢氟酸的混酸,将含氟污泥的纯度从 63.85% 提升到 87.09%。

## 2.2 复合纯化法

酸浸法依靠的是单一或者混合酸浸体系的除杂能力,但在实际应用中除杂范围有限。面对组成成分复杂的含氟污泥,为了得到纯度更高的  $\text{CaF}_2$ ,不同浸出体系的复合纯化法越来越得到研究者的关注。

### 2.2.1 分步提纯法

Fang 等<sup>[15]</sup>通过  $\text{NaOH-HF}$  分步萃取法更为有效地破坏含氟污泥中的硅酸盐结构。该方法在反应温度  $40^\circ\text{C}$ ,固液比 1:2.5,搅拌速度 250 r/min 不变的条件下,分步采用 6%  $\text{NaOH}$  反应 3 h,3%  $\text{HF}$  再反应 1 h,即得到纯度 70.3%、回收率 90.3%的  $\text{CaF}_2$  产品。

吉栋梁等<sup>[16]</sup>在混酸纯化法上做了进一步改进,通过盐化、酸化、氟化、碱化四步法工艺对含氟污泥进行除杂提纯。酸化前将含氟污泥浸泡在 15%的  $\text{NaCl}$  溶液中,根据盐效应理论,该方法增加了难溶性  $\text{CaSO}_4$  在溶液中的溶解度,能够辅助除去  $\text{CaSO}_4$  等杂质。随后酸化处理去除  $\text{CaO}$  及重金属杂质,“氟化+碱化”可有效去除  $\text{Si}$  元素,最终回收率达到了 72.53%且纯度达到了 85%。

### 2.2.2 酸浸-煅烧提纯法

高温煅烧主要针对的是含有机物的含氟污泥,去除有机物的同时通过高温调控矿物相变以实现氟化钙的富集。陆美华等<sup>[17]</sup>研究表明,  $600^\circ\text{C}$  条件下煅烧不仅去除了污泥中的有机物,还破坏了因  $\text{PAC}$  的吸附架桥作用构成的絮凝体结构,但对于高沸点的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaSO}_4$  等杂质的去除有限。

Zhu 等<sup>[18]</sup>分别对半导体工厂、LCD 工厂、生活固废处置中心的含氟污泥通过“ $\text{HF}$  酸浸-煅烧法”进行除杂提纯,工业流程如图 3 所示。该工艺首先通过 2 mol/L  $\text{HF}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、液固比 1:10、反应 1 h 的酸浸体系,将  $\text{CaF}_2$  的含量从 64.2% 提高到 83.7%,再

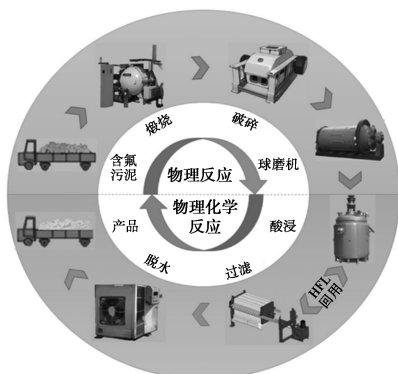


图 3 煅烧-HF 酸浸法工业流程

置于  $500^\circ\text{C}$  下煅烧,可进一步将  $\text{CaF}_2$  纯度提升至 90.5%。

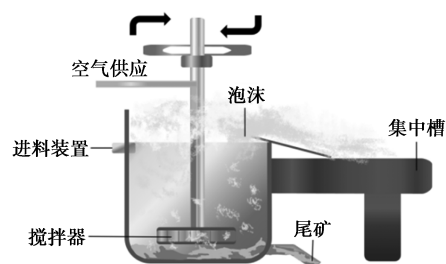
### 2.2.3 水热法-酸浸提纯法

Liao 等<sup>[13]</sup>在酸浸法的基础上耦合水热法,研究表明,当加入 0.5 mol/L  $\text{HF}$ ,反应持续时间 24 h,液固比为 10:1,水热反应温度为  $180^\circ\text{C}$  时,  $\text{CaF}_2$  纯度超过 98%,白度超过 88,回收转化率达到 138%。结果表明,水热条件下,  $\text{HF}$  有助于污泥中的复杂含氟化合物加速分解,并生成微小的  $\text{CaF}_2$  颗粒,其在溶液中反复溶解与再结晶使得最终的  $\text{CaF}_2$  产物具有更均匀的粒度分布和更高的结晶度。但该方法仍具有局限性,尤其是  $\text{CaF}_2$  从纳米级球形颗粒到微米级颗粒的生长机理以及在不同温度和压力条件下的相变行为仍需进一步探索,以便为后期工业化应用奠定理论基础。

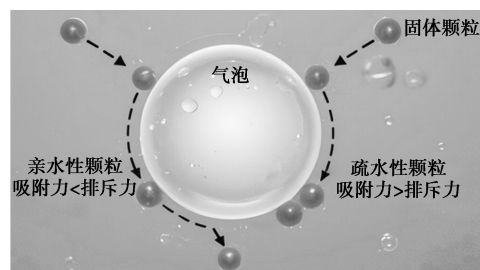
## 2.3 浮选纯化法

### 2.3.1 浮选纯化法作用机理

浮选法通过药剂调控  $\text{CaF}_2$  颗粒的表面亲疏水性,配合矿浆  $\text{pH}$ <sup>[19]</sup> 优化实现目标矿物与杂质的选择性分离,运行过程与分离机理见图 4。当固体颗粒与水中的气泡接触,表面亲水时,颗粒便会从气泡上脱离,当表面疏水时,便被吸附于气泡上随之上浮。因此,浮选剂的选择与含氟污泥的来源关系密切。



(a) 浮选机运行图



(b) 浮选机理图

图 4 含氟污泥浮选提纯运行过程及浮选机理示意图

朱萍等<sup>[20]</sup>采用浮选技术针对集成电路企业的含氟污泥,研究了以油酸钠作为捕收剂的浮选机理,

结果表明,油酸钠中的  $R-COO^-$  与含氟污泥表面的  $Ca^{2+}$  形成离子键,以提高氟化钙表面的疏水性来浮选提纯氟化钙,在最佳浮选剂用量条件下,即油酸钠 1 200 g/t 和  $pH = 9$ ,可将污泥中氟化钙品位从 64.2% 提升到 85%。

谢顺昕等<sup>[21]</sup>基于光伏企业氟化钙污泥的性质分析,在常规浮选的前提下,开发了一套“酸洗解聚-浮选提纯”工艺以解决含氟污泥表面因混凝剂

造成的颗粒团聚的痛点。该工艺采用油酸钠作为捕收剂,硅酸钠作为抑制剂,经过一粗一精的浮选流程将 2 种污泥的品位分别从 49.00%、48.51% 提高到 76.93% 和 75.67%。

### 2.3.2 影响浮选技术的主要因素

决定浮选效果的主要因素有矿浆的表面性质、药剂、矿浆流体力学与矿浆化学环境。影响机理和影响效果如表 4 所示<sup>[22-24]</sup>。

表 4 浮选技术主要影响因素机理

影响因素类别	机理描述	影响效果	
矿物表面性质	润湿性	接触角( $\theta$ )决定矿物疏水性, $\theta > 90^\circ$ 易被气泡捕获	疏水性矿物浮选效率高,亲水性矿物需捕收剂修饰
	表面结构	表面粗糙度高可使接触角 $\theta$ 提高,孔隙率高促进气泡滞留	污泥中颗粒团聚形成致密结构(如 PAC 絮凝体),覆盖活性位点,导致浮选选择性下降
药剂	捕收剂	极性基团键合矿物表面,非极性链增强疏水性	选择性吸附目标矿物,过量使用导致非选择性浮选
	抑制剂	竞争吸附或溶解活性位点,抑制杂质上浮	抑制杂质,过量使用可能降低目标矿物回收率
	起泡剂	降低气泡表面张力,调控泡沫稳定性与尺寸	小气泡(0.5~1 mm)增加碰撞概率,过稳泡沫夹带杂质
矿浆流体力学	气泡-颗粒碰撞	湍流强度影响碰撞频率,颗粒粒度决定附着概率	碰撞的最佳粒度范围,湍流动能耗散率( $\epsilon$ )决定效率高低
	矿化气泡稳定性	三相接触线与钉扎力能决定气泡-颗粒结合强度	疏水性矿物的黏附力要大于亲水性矿物
矿浆化学环境	pH	调控矿物表面电荷及药剂解离状态	油酸在 $pH 8\sim 9$ 时解离为 $RCOO^-$ ,与 $Ca^{2+}$ 结合吸附于萤石表面

谢顺昕等<sup>[25]</sup>针对半导体行业的含氟污泥,酸洗解聚后以油酸钠为捕收剂、酸化水玻璃为抑制剂,设计优化 1 段粗选、3 段精选、3 段扫选的多级浮选闭路实验,最终获得  $CaF_2$  品位为 84.41%、回收率为 75.72% 的氟化钙精矿。由此可见,浮选法的应用需要基于含氟污泥的结构组成,优化影响浮选效果的几个主要因素,针对性搭配浮选剂用量,提高浮选气泡的稳定性及与污泥颗粒的碰撞频率。

综上所述,酸浸、煅烧等单一提纯体系难以制备高纯度氟化钙产品,复合提纯法可有效弥补单一体系的短板,是含氟污泥纯化技术的重要发展方向;浮选法因工艺简便、工业化落地难度低广受关注,但仍存在分选效率低、药剂成本高的痛点。总之,现有含氟污泥提纯技术仍存在杂质去除不彻底、成本偏高、易产生二次污染等局限,开发生物酸浸、废酸再生循环等创新技术是突破上述瓶颈的主要路径。

## 3 含氟污泥资源化利用

尽管含氟污泥提纯氟化钙是缓解萤石矿资源短缺必然趋势,但面对不同品位的氟化钙污泥,因地制

宜的短流程资源化处理处置也是很多产含氟污泥企业的优先选择。

### 3.1 炼钢掺烧

在炼钢工业中, $CaF_2$  含量高于 85% 的含氟污泥可替代冶金级萤石作为助熔剂使用,以降低熔渣共晶温度与烧结能耗、改善熔渣流动性、抑制有害固相生成,提升钢材的机械强度与耐腐蚀性<sup>[26]</sup>。

Lin 等<sup>[4]</sup>利用乳化沥青作为黏结剂,在室温下将含氟污泥造粒,制备人造萤石用作炼钢过程中的助熔剂与造渣剂。该乳化沥青的黏度强,流动性好,添加量为 12.5% 时,所制备出人造萤石球团机械强度最高且满足炼钢要求。含氟污泥应用于炼钢产业是一条重要的资源化途径,但在制备人造萤石块时工艺的高耗能易导致成本的增加,含氟污泥组成的复杂性亦会对钢产品的品质带来不确定性。

### 3.2 制备微晶玻璃

将固体废弃物玻璃化的优点是玻璃化网络可固定重金属离子,使其引发的二次污染风险也大大降低。Wen 等<sup>[26]</sup>研究了采用熔融一步热处理的方法,以氟化钙污泥为晶核剂,实现透辉石的控制晶化。

经研究表明,含氟污泥中的氟化钙可破坏玻璃硅铝网络结构,降低体系熔点并提升流动性,减少能耗,使产品硬度大于 6.5 GPa,抗弯强度超过 110 MPa,耐酸性超过 99.5%,同时实现有毒金属的稳定固化。

Xu 等<sup>[7]</sup>通过掺入不同量的含氟污泥作为主要组分制备了微晶玻璃,结果表明含氟污泥的加入有助于降低晶化温度,促进晶体的形成。当污泥的添加量达到 50%时,微晶玻璃的抗弯强度和维氏硬度显著提高。以  $\text{CaF}_2$  基制备微晶玻璃具有良好的热稳定性、化学稳定性和机械强度。

### 3.3 水泥固化

水泥窑协同处置固体废物制备水泥熟料是常见的固废处置方式。含氟污泥的适量掺入,可改善生料的易烧结性和抗压强度,使基质的力学性能和耐久性甚至优于原水泥基材料。

Ma 等<sup>[6]</sup>以 0%、3%、6%、9%和 12%(重量)的含氟污泥掺入砂浆,研究结果表明在 20℃下,当含氟污泥掺量为 3%时,复合材料在 7 d 内强度可达 42.5 MPa,凝结时间和流动性均为最佳,且符合建筑水泥标准。含氟污泥的掺入可延缓水泥水化放热与凝结时间,强化生料固态扩散、降低液相黏度;但该技术存在污泥掺量上限低的瓶颈,难以实现大规模资源化利用,未来需在保障水泥材料性能的前提下,进一步优化工艺以提升含氟污泥的掺入比例。

### 3.4 制备吸附剂

与传统吸附剂相比,介孔二氧化硅材料具有化学性质稳定、对金属离子吸附效率高等优点。Kao 等<sup>[24]</sup>以含氟污泥(5%)为原料合成了介孔二氧化硅材料,可有效去除六甲基二硅氮烷(HMDS),HMDS 浓度为  $100 \times 10^{-6}$ 、 $300 \times 10^{-6}$ 、 $500 \times 10^{-6}$  时,吸附量分别达到 40、72、86 mg/g,且该材料使用过程中可避免因加热产生的二氧化硅粉末堵塞 RTO 炉,大大提高了 RTO 焚烧炉的使用寿命。利用含氟污泥制备的吸附剂拥有成本低廉、吸附性能潜力大等优点,但氟化物的浸出风险、工艺的复杂性以及性能的稳定性仍需要进一步研究。

### 3.5 其他资源化途径

Liu 等<sup>[27]</sup>利用高品位的含氟污泥制备氟基发光材料,通过熔融-水淬法,将原料按比例混合:2%  $\text{Er}_2\text{O}_3$ 、5%  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ 、31%  $\text{B}_2\text{O}_3$ 、50%  $\text{CaF}_2$  在 1 100℃ 熔融 15 min,水淬后研磨成微米级颗粒,合成  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ - $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{CaF}_2$  玻璃陶瓷,使用 0.3 mol/L HCl 蚀刻处理 15 min,使表面形成覆盖  $\text{BiOCl}$  纳米片核壳结构,制备成光催化剂。

Park 等<sup>[28]</sup>通过使用 52.45%品位的半导体行业的含氟污泥来替代天然萤石制备矿化剂,经测试,含氟污泥矿化剂亦可促进固相结晶和  $\text{CaO}$  扩散,显著加速  $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_8$  的生成,同时使烧结温度降低约 50℃,烧结后白度指数达  $95 \pm 2$ ,与添加天然萤石矿化剂的样品无显著差异。该资源化方法相比萤石制备矿化剂成本和能耗更低,兼具环保与经济价值,未来需优化凝结时间调节,并探索其在其他类型水泥中的应用潜力。

## 4 结论

随着光伏、半导体等新兴产业的快速发展,含氟污泥产量持续增长,对其开展高效环保的资源化利用,既是防控固废环境风险的必然要求,也是缓解萤石战略资源短缺的重要路径。

现有以回收  $\text{CaF}_2$  为目标的提纯技术中,酸浸纯化、复合纯化、浮选纯化 3 大主流工艺,针对特定来源的含氟污泥均可制得纯度 80%~90%的  $\text{CaF}_2$  产品,但仍存在二次污染防治难、能耗偏高、产品纯度提升受限等瓶颈。未来需聚焦绿色化学替代、多技术协同与智能化调控,开发生物-离子液体酸浸、微波-超临界耦合工艺、纳米气泡-AI 浮选系统等新技术,构建高效低碳的闭环资源化模式。

目前含氟污泥直接资源化利用以其作为辅料添加协同处置为主,涵盖炼钢助熔、微晶玻璃制备、水泥固化等应用场景,不同产品中污泥最大掺量差异显著,整体平均利用率仅 10%左右,能耗与二次污染风险也制约了其规模化应用。未来需通过多技术协同优化、高值化材料设计与智能化调控突破现有瓶颈。通过技术创新与政策驱动,含氟污泥有望从“环境负担”转型为“城市矿山”,助力循环经济与碳中和目标。

## 参考文献

- [1] 罗立群,张倩倩,田国庆.典型产业含氟废水来源与综合治理技术研究现状[J].中国矿业,2025,34(4):178-189.
- [2] Li W, Ma Z, Yan J, et al. Study on the resource utilization of high fluorine-containing organic waste through fluidized incineration[J]. Waste Disposal & Sustainable Energy, 2022, 4(2): 117-129.
- [3] He T, Da Y, Shi C, et al. Recovery of thermally treated fluorine-containing sludge as the substitutions of Portland cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121030.
- [4] Lin K T, Wang Y F, Jhng B S, et al. Effects of emulsified asphalt on the mechanical properties of granulation of calcium fluoride sludge[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2021, 23(1): 231-239.

- [5] 何廷树,王敏豪,达永琪,等.含氟污泥的理化性质及其对水泥性能和环境安全性的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(8):1295-1301.
- [6] Ma X, He T, Da Y, *et al.* Potential of sulphoaluminate cement to solidify fluorine-containing sludge[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346: 128427.
- [7] Xu Y, Lu C, Fang Y, *et al.* Production of glass-ceramics from fluorinated sludge: Structure, properties and leaching risk[J]. Ceramics International, 2024, 50(20): 37732-37741.
- [8] Liu Y, Fu Y, Zheng L, *et al.* Leaching characteristics and solidification strategy of heavy metals in solid waste from natural graphite purification[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(11): 30892-30904.
- [9] Da Y, He T, Shi C, *et al.* Potential of preparing cement clinker by adding the fluorine-containing sludge into raw meal[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 403: 123692.
- [10] Tran Q T P, Lin P H. Optimizing the recovery process of ceramic grade calcium fluoride from hydrofluoric/hexafluorosilicic acid wastewater[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 333: 130125.
- [11] 陈长铸.由氟化钙污泥提纯制备氟化钙的工艺条件研究[D].合肥:合肥工业大学,2022.
- [12] 谢明,马小华.用含氟污泥和含氟硫酸生产氟化钙的工艺研究[J].广州化工,2014,42(11):120-121,163.
- [13] Liao G, Li L, Kang Z, *et al.* Conversion of hazardous fluorine-containing sludge into monodisperse, highly crystalline, and acid-grade CaF<sub>2</sub> nanomaterials via digestive ripening under acid-enhanced hydrothermal treatment[J]. Environmental Science-Nano, 2025, 12: 3191-3202.
- [14] 陆美华,杨文滨,朱萍.不同条件下混酸酸浸对含氟污泥提纯的差异化研究[J].上海建材,2024,(6):18-23.
- [15] Fang J, Yang H, Gao P, *et al.* NaOH-HF stepwise extraction method for extracting high-purity calcium fluoride from fluoride-containing sludge: A sustainable approach[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 364: 132437.
- [16] 吉栋梁,郎玉冬,丁莹,等.含氟污泥除杂工艺优选及机理分析[J].有色金属(冶炼部分),2023,(9):143-149.
- [17] 陆美华,徐兵,朱萍.煅烧对含氟化钙污泥提纯效果的影响[J].上海建材,2024,(5):13-17.
- [18] Zhu P, Li Y, Xia B, *et al.* Purification mechanism of fluoride-containing sludge from different sources by hydrometallurgy[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5): 110304.
- [19] Huang J, Zhang Q, Li H, *et al.* Difficulties and recent achievements in flotation separation of fluorite from calcite-An overview[J]. Minerals, 2022, 12(8): 957.
- [20] 朱萍,夏斌,刘强,等.浮选提纯集成电路行业含氟污泥研究[J].当代化工研究,2024,(23):188-190.
- [21] 谢顺昕,李育彪,薛浩,等.氟化钙污泥性质分析及浮选提纯工艺研究[J/OL].矿产综合利用,1-9[2026-03-15].<https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20231118.1440.002>.
- [22] Gao Z, Wang C, Sun W, *et al.* Froth flotation of fluorite: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 290: 102382.
- [23] Wang R, Han H, Sun W, *et al.* Hydrophobic behavior of fluorite surface in strongly alkaline solution and its application in flotation[J]. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 609: 125661.
- [24] Kao C Y, Lin M F, Nhat-Thien N, *et al.* Hexamethyldisilazane removal with mesoporous materials prepared from calcium fluoride sludge[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2018, 18(5): 3314-3319.
- [25] 谢顺昕,李育彪,卢青,等.半导体行业含氟污泥酸洗解聚及浮选工艺研究[J].非金属矿,2023,46(6):73-77.
- [26] Wen Q, Liu B, Zhang J, *et al.* Glass-ceramics prepared from desulfurized electrolytic manganese residue and the nucleation promotion effect of calcium fluoride in glass phase transition[J]. Ceramics International, 2024, 50(3PA): 4563-4572.
- [27] Liu Y C, Li G B, Wang D, *et al.* Lanthanide-doped upconversion glass-ceramic photocatalyst fabricated from fluorine-containing waste for the degradation of organic pollutants[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 638: 461-473.
- [28] Park S, Na H, Hwang B C, *et al.* Characteristics of white portland cement clinker produced from low-temperature sintering technology using fluorine based semiconductor sludge[J]. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2024, 12(2): 169-177. ■

## 南通星辰复合材料压力容器规模化推广

近日,配套南通星辰树脂材料的大容积玻纤IV型瓶及储氢管束集装箱系统正式发布,标志着该产品在复合材料压力容器领域实现规模化推广。

今年一季度,南通星辰技术中心自主研发的新一代储氢环氧树脂产品,已成功向国内头部储氢瓶企业批量供货,累计供货量达18.75t,凭借优异性能赢得客户高度认可。

近年来,南通星辰技术中心聚焦车载及储运储氢领域,精准锚定III型、IV型储氢气瓶核心应用市场。此次成果不仅验证了产品在高压力、长周期使用场景下的可靠性,更进一步巩固企业在氢能储运新材料市场的竞争优势,为氢能产业链规模化应用提供关键材料支撑。

(南通星辰)