

有色金属冶炼烟气净化污酸前端除氟工艺研究

张 敏¹, 刘胜宏², 倪 金¹, 黄 昶¹, 林汉雨², 曹雷斌²

(1. 江西铜业技术研究院有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 江西金德铅业股份有限公司, 江西 德兴 334200)

摘要: 针对有色金属冶炼烟气净化污酸中氟离子(F⁻)浓度高、腐蚀性强, 导致处理工艺难以自动化的问题, 研发了一款污酸除氟药剂(JCFRR001)。该药剂在硫酸(H₂SO₄, 5~55 g/L)和F⁻(5~25 g/L)质量浓度波动条件下表现出良好的适应性, 可将出水F⁻质量浓度稳定控制在2.5 g/L以下。实际污酸处理结果表明, 当初始F⁻质量浓度为5.6~18.4 g/L时, 除氟后出水F⁻质量浓度降至0.97~2.49 g/L, 所得除氟渣中氟化钙(CaF₂)质量分数为77.47%~88.21%, 满足《萤石》(YB/T 5217—2019)中萤石矿粉FF-75品级要求。研究还证实, 前端除氟工艺对后续硫化除重工艺无显著影响, 为污酸处理系统的自动化改造提供了技术支撑。

关键词: 污酸; 除氟; 萤石矿粉; 资源化回收; 重金属离子

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.013

中图分类号: TF812; X758 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0139-07

有色金属冶炼烟气净化工序会产生大量的含氟污酸, 目前大多采用硫化钠除重、石灰中和的组合工艺处理污酸^[1-2]。然而, 该污酸处理工艺存在以下两大主要问题: 首先是在前端高效去除氟离子(F⁻), 导致设备和仪表被腐蚀, 使得污酸处理工艺难以实现自动化运行^[3]; 其次, 该方法无法有效分离氟化钙(CaF₂)和硫酸钙(CaSO₄), 钙渣中氟元素含量较高, 增加了钙渣的处置难度^[4]。由于钙渣处置难度大, 部分企业将钙渣返回底吹炉处置, 这不仅增加了冶炼成本, 还导致氟元素在系统中持续累积。污酸废水除氟方法众多, 包括吸附法^[5]、离子交换法^[6]、化学沉淀法^[7]、电化学法^[8]、膜分离法^[9]等, 然而同步回收氟资源相关的研究鲜有报道。

本项目针对自研的除氟药剂, 开展了相关除氟性能研究。研究表明, 该药剂能够在酸性体系下实现F⁻的高效前端脱除, 达到减缓设备和仪表腐蚀的效果, 为后续实现自动化运行提供可能。同时, 产出的除氟渣可作为萤石矿粉产品销售, 实现氟元素从系统中开路, 避免累积。

1 实 验

1.1 实验原料

实验所用含氟污酸分别为配制的模拟污酸与工业生产的实际污酸。模拟污酸用于验证污酸中硫酸

(H₂SO₄, 5~55 g/L)与F⁻(5~25 g/L)在质量浓度波动下除氟药剂的适用性; 实际污酸则用于验证在工况波动条件下除氟药剂的实际除氟效果。查阅监测数据可知, 实际污酸的F⁻质量浓度在5~20 g/L之间波动。

1.2 试剂与仪器

实验试剂: 除氟药剂(JCFRR001, 自研)、NaF(分析纯, 99%)、浓H₂SO₄(分析纯, 98%)、NaOH(分析纯, 96%)、NaCO₃(分析纯, 99%)等。实验中采用的主要仪器与设备见表1。

表1 主要仪器与设备

Table 1 Major instruments and equipment

名称	型号	生产厂家
磁力搅拌器	DF-101S	上海析牛莱伯仪器有限公司
多参数水质测定仪	GL-900Q	山东格林凯瑞精密仪器有限公司
微型型氟离子计	PXS-F	杭州齐威仪器有限公司
循环水式多用真空泵	SHZ-D III	杭州旌斐仪器科技有限公司
鼓风干燥箱	DHG-9140A	上海一恒科学仪器有限公司
pH计	pHS-25	上海仪电科学仪器股份有限公司
电子天平	ME2002	梅特勒托利多科技有限公司
ICP-OES发射光谱仪	Avio200	珀金埃尔默股份有限公司

收稿日期: 2025-07-21; 修订日期: 2025-12-18

作者简介: 张敏(1992—), 男, 江西南丰人, 博士, 工程师, 研究方向: 矿山、冶炼废水处理与资源化利用, E-mail: minzhangjt@163.com; 通信作者: 刘胜宏, 高级工程师, E-mail: LSH409@126.com

1.3 实验方法

首先量取1 L模拟或实际污酸,测定污酸中 F^- 质量浓度后,测算除氟药剂的添加量。然后将测算量的除氟药剂投入污酸中,在300 r/min转速下常温反应30 min,使除氟药剂与污酸中的 F^- 充分反应。随后,对溶液进行过滤,分离出滤液和滤渣,分别对滤液和滤渣进行相关的分析检测,从而确定除氟效果与萤石品位。本实验重点对污酸中 F^- 的去除率、沉淀中的 CaF_2 和各金属离子的含量进行考查。

1.3.1 氟去除率

去除率是衡量某种物质从载体中被去除程度的关键指标。 F^- 的去除率通常定义为除氟过程中 F^- 被去除的比例,它是衡量含氟污酸处理技术效率的核心指标。 F^- 的去除率的计算公式见式(1)。

$$\delta = \frac{C_0 \times V_0 - C_1 \times V_1}{C_0 \times V_0} \times 100\% \quad \text{式(1)}$$

式中: δ 为 F^- 去除率,%; C_0 为污酸中的初始氟浓度,g/L; C_1 为除氟后污酸中的氟浓度,g/L; V_0 为污酸的初始体积,L; V_1 为除氟后污酸的体积,L。

1.3.2 CaF_2 含量

沉淀中 CaF_2 质量分数是评估含氟污酸处理效果、资源化回收潜力以及工艺经济性的关键指标。沉淀中的 CaF_2 质量分数的计算公式见式(2)^[10]。

$$\omega_{CaF_2} = \frac{\omega_F}{R} \times 100\% \quad \text{式(2)}$$

式中: ω_{CaF_2} 为沉淀中 CaF_2 质量分数,%; ω_F 为沉淀中氟元素的质量分数,%; R 为 CaF_2 中氟元素质量占氟化钙分子质量的比例,近似值为48.67%。

其中, ω_F 可根据国家标准GB/T 5195.1《萤石中氟化钙含量的测定》中的方法进行测定。

2 结果与讨论

2.1 污酸初始 F^- 质量浓度对除氟效果的影响

有色金属冶炼产生的烟气中含有大量的氟化物,烟气通过动力波洗涤后会产生含氟污酸^[11]。由于烟气中的氟化物浓度波动,导致形成的含氟污酸中的 F^- 质量浓度也存在一定的波动^[12]。监测数据显示,实际污酸中 F^- 质量浓度在5~20 g/L之间波动。

为了解污酸中 F^- 浓度对除氟药剂的除氟效果的影响,实验配置了不同 F^- 浓度的模拟污酸,初始 F^-

质量浓度分别为5, 10, 15, 20和25 g/L,初始 H_2SO_4 质量浓度为50 g/L,体积为1 L,反应时间为0.5 h,药剂按照理论值1倍投加。反应结束后,进行固液分离,并对滤渣进行烘干处理,分别得到除氟后液与除氟渣。检测除氟后液中 F^- 质量浓度以及除氟渣中 CaF_2 质量分数,最终可得除氟渣中 CaF_2 含量以及 F^- 去除率,如图1所示。

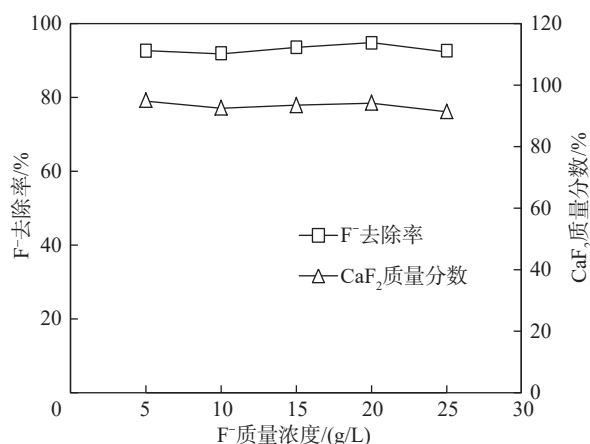


图1 污酸中初始 F^- 质量浓度对 F^- 去除率及除氟渣中 CaF_2 质量分数的影响

Fig. 1 Effects of initial F^- mass concentration in waste acid on F^- removal efficiency and calcium fluoride content in defluorination residue

实验结果表明:在污酸初始 F^- 质量浓度为5~25 g/L的条件下,除氟药剂对 F^- 的去除率达到90%以上。当污酸中初始 F^- 质量浓度为20 g/L时, F^- 的去除率最高,可达到94.87%;当污酸中初始 F^- 质量浓度为10 g/L时, F^- 的去除率最低,但仍可达到91.78%。这说明初始 F^- 质量浓度在5 g/L~25 g/L范围内时,该除氟药剂可有效地去除污酸中的 F^- 。另外,在污酸初始 F^- 质量浓度为5~25 g/L时,产生的除氟渣中 CaF_2 质量分数均达到了90%以上,满足《萤石》(YB/T 5217—2019)中萤石矿粉FF-90(表2) CaF_2 含量的要求。这说明污酸中初始 F^- 质量在该范围内时,除氟药剂利用率高,副产物少,确保了除氟渣中 CaF_2 的含量稳定。此外,模拟污酸与实际污酸中铁含量均低于检出限($<1 \times 10^{-6}$ g/L),且除氟药剂中不含铁,因此,所得除氟渣中 Fe_2O_3 含量远低于0.2%。

2.2 污酸初始硫酸质量浓度对除氟效果的影响

有色金属冶炼产生的烟气中含有大量的 SO_2 ,

表2 萤石矿粉的化学成分

Table 2 Chemical composition of fluorite powder (% , mass fraction)

牌号	化学成分		
	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	H ₂ O
FF-95	≥95.00	≤0.20	≤0.50
FF-90	≥90.00	≤0.20	≤0.50
FF-85	≥85.00	≤0.30	≤0.50
FF-80	≥80.00	≤0.30	≤0.50
FF-75	≥75.00	≤0.30	≤0.50
FF-70	≥70.00	—	—

部分SO₂在动力波洗涤过程中经氧化后进入液相形成污酸^[13]。监测可知，实际污酸中H₂SO₄质量浓度在14.6~54.5 g/L之间波动。为了探究初始H₂SO₄不同质量浓度下该除氟药剂的除氟效果，并验证其实现高效除氟的适用性，本研究进行了如下实验。

实验配制了不同质量浓度H₂SO₄的模拟污酸，浓度分别为5, 15, 25, 35, 45和55 g/L，初始F⁻质量浓度为15 g/L，体积为1 L，反应时间为0.5 h，药剂按照理论值的1倍投加。反应结束后，进行固液分离，并对滤渣进行烘干处理，分别得到除氟后液与除氟渣。检测除氟后液中F⁻质量浓度以及除氟渣中CaF₂质量分数，最终可得除氟渣中CaF₂质量分数以及F⁻去除率。

如图2所示：当初始H₂SO₄质量浓度为5 g/L时，F⁻去除率高达93.84%。随着初始H₂SO₄质量浓度增高至35 g/L，F⁻的去除率小幅下降至91.25%；当初

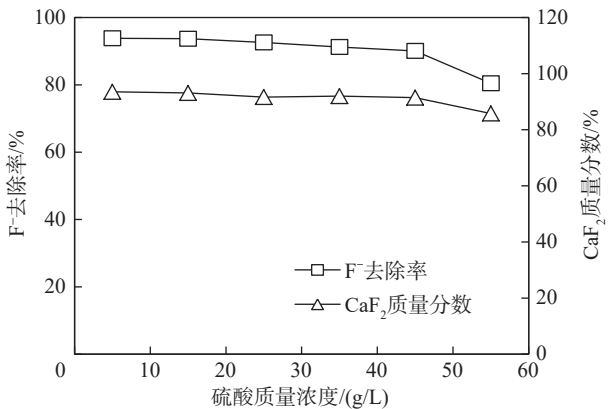


图2 污酸中初始硫酸质量浓度对F⁻去除率及除氟渣中CaF₂质量分数的影响

Fig. 2 Effects of initial sulfuric acid mass concentration in waste acid on F⁻ removal efficiency and calcium fluoride content in defluorination residue

始H₂SO₄质量浓度升至55 g/L时，F⁻的去除率依旧维持在80.46%。这是由于H₂SO₄浓度高时，根据式(3)可知：溶液中的H⁺浓度过高，电离平衡向左进行，导致溶液中F⁻的有效浓度降低，从而使得除氟药剂对F⁻的捕捉效率降低^[14]；反之，随着H₂SO₄质量浓度下降，溶液中的H⁺浓度开始降低，电离平衡向右进行，此时，溶液中HF浓度开始降低，F⁻浓度逐渐升高，从而提高了除氟药剂对F⁻的捕捉效率。



对实验所得除氟渣中CaF₂质量分数分析可知：当初始硫酸质量浓度为5 g/L时，除氟渣中氟化钙质量分数高达93.52%；随着初始硫酸浓度的上升，除氟渣中CaF₂质量分数有所下降，但均高于85.77%。以上结果说明，H₂SO₄浓度过高时，该除氟药剂与F⁻的结合受到抑制，导致CaF₂的生成受阻。在初始H₂SO₄质量浓度为5~55 g/L时，除氟药剂均能快速高效地与F⁻结合，所得除氟渣均满足《萤石》(YB/T 5217—2019)中萤石矿粉FF-85(表2)的要求。

2.3 实际污酸除氟效果

模拟污酸除氟实验有效评估了除氟药剂在各条件下的除氟效果，而实际污酸的除氟验证更具工程价值。首先，废水的成分和特性复杂，其体系与模拟污酸差异显著，因此实际污酸除氟验证能更好地反映真实环境的复杂性，评估除氟药剂的有效性。其次，进行实际污酸除氟验证，旨在获得更准确和可靠的数据，以评估优化条件下的除氟效率并分析可能的副产品。另外，实际污酸的除氟验证还能评估除氟药剂在工程应用中的可行性^[15]。

表3为实际污酸中F⁻和H₂SO₄的质量浓度，其中F⁻质量浓度为5.6~18.4 g/L，硫酸质量浓度为14.6~44.4 g/L，属于强酸且高浓度氟体系。前期条件实验表明，在F⁻浓度介于5~25 g/L、硫酸浓度介于5~55 g/L、反应时间为0.5 h、药剂投加量为理论值1倍的条件下，该除氟药剂均能取得较好效果。因此，本节考察了药剂对实际含氟污酸的除氟效果及所产除氟渣CaF₂含量，实验结果如图3、图4所示。

分别对表3不同日期取样的实际污酸开展除氟实验，以验证除氟药剂在不同质量浓度F⁻和H₂SO₄条件下药剂的适用情况。除氟药剂对实际污酸的处

表 3 某有色金属冶炼企业多批次实际污酸中 F⁻ 和 H₂SO₄ 质量浓度情况

Table 3 Mass concentrations of F⁻ and H₂SO₄ in multiple batches of actual waste acid from a nonferrous metal smelting enterprise

日期	F ⁻ /(g/L)	H ₂ SO ₄ /(g/L)
5月3日	7.6	43.9
5月27日	5.6	44.4
7月13日	18.4	14.6
10月17日	15.08	30.7
11月28日	14.93	42.3

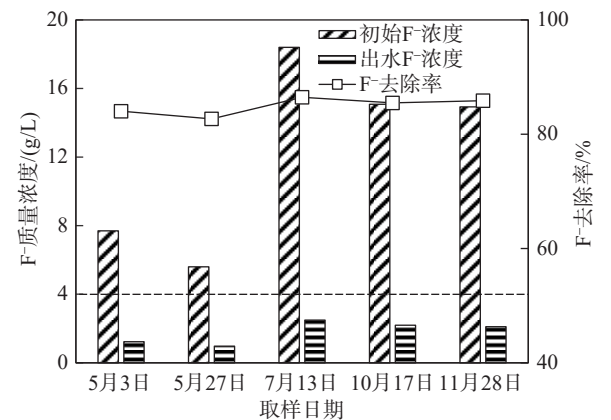


图 3 除氟药剂对实际污酸的除氟效果
Fig. 3 Defluorination performance of the reagent on actual waste acid

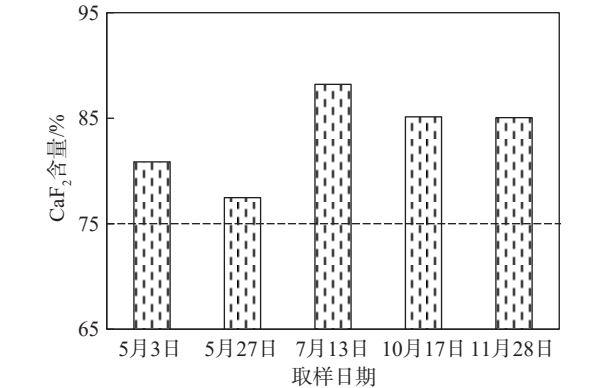


图 4 实际污酸除氟所产除氟渣中 CaF₂ 的含量
Fig. 4 Calcium fluoride content in fluorite concentrate produced from actual waste acid defluorination

理效果, 结果表明: 尽管实际污酸 F 质量浓度存在较大波动(5.6~18.4 g/L), 但各批次的 F 去除率均稳定在 80% 以上, 说明该除氟药剂能够稳定降低实际污酸中的氟浓度, 经过除氟后各污酸中 F 质量浓度均低于 2.5 g/L, 相较处理前污酸 F 浓度, 能够有效

缓解其对设备及仪表的腐蚀。实际污酸的 F 去除率介于 82.68%~86.47%, 普遍低于模拟污酸的 F 去除率, 这是由于实际污酸成分较为复杂, 体系中的一些离子可能会与 F 形成络合物。此外, 部分离子如 CO₃²⁻, SO₄²⁻ 硫酸根还会存在共沉淀。以上因素使得实际污酸的除氟率低于模拟污酸。

图 4 为实际污酸除氟所产除氟渣中 CaF₂ 质量分数, 结果表明: 尽管各批次所产除氟渣中 CaF₂ 质量分数存在一定波动, 但各样品(干基)中 CaF₂ 质量分数均高于 75%, 达到《萤石》(YB/T 5217—2019)中萤石矿粉 FF-75(表 2)的要求。这说明该除氟药剂在实际污酸处理中能够稳定地产出符合要求的萤石矿粉产品。实际污酸除氟后所产除氟渣中 CaF₂ 质量分数为 77.47%~88.21%, 低于模拟污酸所产萤石矿粉中 CaF₂ 质量分数, 这是由于体系中的部分离子如 SO₄²⁻ 与 Ca²⁺ 形成沉淀进入除氟渣中, 从而降低了萤石矿粉的品位。

为进一步分析所产除氟渣的物相组成, 对所得除氟渣样进行 X 射线衍射(XRD)分析, 结果如图 5 所示。结果表明: 除氟渣中的主要成分为 CaF₂, 其含量与化学法所得结果基本一致。另外, 除氟渣中还含有少量的 CaSO₄ 水合物以及钙钠矾。

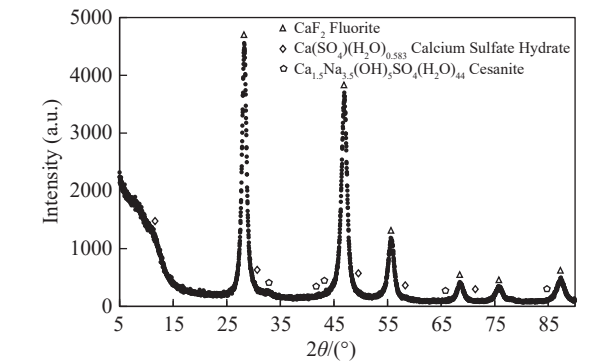


图 5 所产除氟渣的 XRD 物相分析图
Fig. 5 XRD phase analysis of the produced fluorite powder

通过对实际污酸进行除氟实验, 验证了污酸除氟药剂(JCFRR001)的有效性 with 稳定性。该污酸除氟药剂在 F 质量浓度 5.6~18.4 g/L、硫酸质量浓度 14.6~44.4 g/L 条件下, F 去除率均稳定在 80% 以上, 出水 F 质量浓度均低于 2.5 g/L, 较初始污酸 F 质量浓度显著下降, 能够有效缓解污酸对设备及仪表的腐蚀。各批次所得除氟渣中 CaF₂ 质量分数

为77.47%~88.21%，均达到《萤石》(YB/T 5217—2019)中萤石矿粉FF-75(表2)的要求。

2.4 前端除氟对后续除重的影响

现有的污酸无害化处理采用硫化氢除重、石灰中和的组合工艺，通过硫化法将污酸中重金属离子沉淀分离^[16]。然而，增加前端除氟工艺是否会对后续的硫化工艺造成影响，至今缺乏研究。因此，为了进一步探索前端污酸除氟对后续硫化除重工艺的影响，分别实施了如下方案：方案一，对污酸先进行前端除氟，再进行硫化除重；方案二，直接对污酸进行硫化除重。随后，对两种方案的污酸除重效果以及所得硫化渣中各重金属的含量进行对比分析。

方案一试验条件如下：在1 L实际污酸中，按照理论值的1倍投加除氟药剂，搅拌反应0.5 h后，进行固液分离。向滤液中加入理论量NaHS药剂，搅拌反应0.5 h后，进行固液分离，分别分析上清液各种金属离子浓度，以及烘干后的滤渣中各金属离子的含量。方案二试验条件如下：在1 L实际污酸中，加入理论量NaHS药剂，搅拌反应0.5 h后，进行固液分离，分别分析上清液各种金属离子浓度，以及烘干后的滤渣中各金属离子的含量。以上两个方案对比试验所使用污酸的成分如下：As, Cd, Pb质量浓度分别为1530, 130.7, 10.6 mg/L。通过对比两个方案所产的除重后上清液与除重渣成分，确定前端除氟对后续工艺是否有影响。

图6对比了两种方案除重后上清液中As, Pb, Cd的浓度。结果显示：方案一上清液中As, Pb, Cd质量浓度分别为3.22, 1.26, 2.67 mg/L；方案二中As, Pb, Cd质量浓度分别为3.55, 1.38, 2.53 mg/L。通过比较可知，两种方案的除重后液中各种金属离子质量浓度均相近，无显著差异。以上结果表明：前端除氟不会对后续硫化除重过程中重金属离子脱除造成影响。

为进一步确认前端除氟对后续除重工艺的影响，对两种方案所产的除重渣进行成分对比。结果如图7所示：方案一除重渣中As, Pb, Cd, Ca质量分数分别为47.58%, 0.426%, 4.26%和0.279%；方案二除重渣中As, Pb, Cd, Ca质量分数分别为45.84%, 0.515%, 4.54%和0.073%。两个方案得到

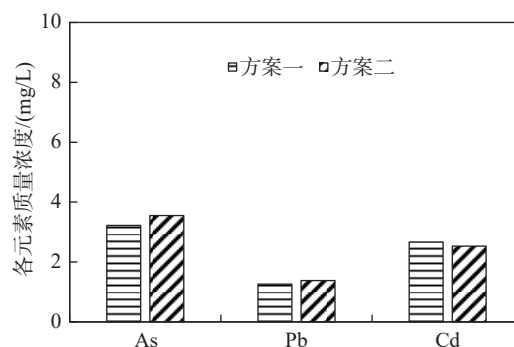


图6 两种方案除重后液中主要重金属离子浓度

Fig. 6 Concentrations of major heavy metal ions in treated solutions after applying two treatment procedures

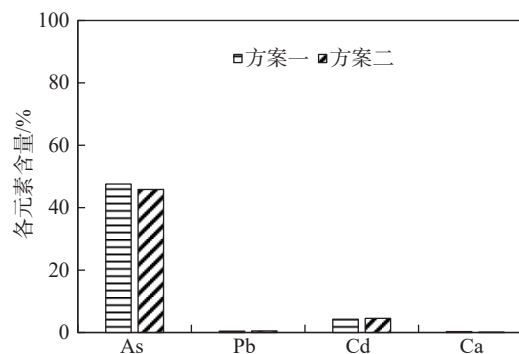


图7 两种方案得到的硫化渣主要金属元素含量

Fig. 7 Metal element composition of sulfide residues obtained from two treatment procedures

的除重渣中As元素的占比在45.84%~47.58%，Cd元素的占比在4.26%~4.54%，主要元素含量相近。这说明除氟药剂未导致除重渣主组分发生变化，从而说明了前端除氟过程并不会影响后续的除重工艺。

3 结 论

本研究验证了自研的污酸前端除氟药剂(JCFRR001)在模拟污酸(F^- : 5~25 g/L; H_2SO_4 : 5~55 g/L)条件下具有优异的除氟性能；除氟率达80.46%~93.84%，且生成的除氟渣达到《萤石》(YB/T 5217—2019)中萤石矿粉FF-85级标准。需要注意的是，硫酸浓度升高会抑制除氟效果。在实际污酸(F^- : 5.6~18.4 g/L; H_2SO_4 : 14.6~44.4 g/L)处理中，除氟率虽略有下降但仍保持在80%以上，产出除氟渣符合萤石矿粉FF-75级标准。同时，对比试验证实前端除氟工艺对后续硫化除重工艺的除重渣和除重后液中金属离子含量均无显著影响。综上所述，本研究为冶炼污酸前端除氟提供了一种可行的工艺路

径,具备工程化和推广应用的潜力。

参考文献:

- [1] 闫卫军. 污酸废水处理工艺及试验研究[J]. 山西化工, 2024, 44(2): 233-235.
- [2] 李栋, 袁乐乐, 张勇兵, 等. 有色冶金污酸废水资源化研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(6): 822-830.
- [3] 冯炜光, 周中华, 陈新, 等. 铅锌冶炼污酸资源化利用技术研究[J]. 云南冶金, 2024, 53(3): 94-99.
- [4] 刘冰冰, 季常青. 锌冶炼污酸废水循环利用技术研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(12): 179-182.
- [5] CHEN X, WAN C X, YU R, et al. A novel carboxylated polyacrylonitrile nanofibrous membrane with high adsorption capacity for fluoride removal from water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 411: 125113.
- [6] SHIN E, DREISINGER D B, BURNS A D. Removal of fluoride from sodium sulfate brine by zirconium pre-loaded chelating resins with amino-methyl phosphonic acid functionality[J]. Desalination, 2021, 505: 114985.
- [7] KUMAR A, BALOUCH A, ABDULLAH. Remediation of toxic fluoride from aqueous media by various techniques[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2021, 101(4): 482-505.
- [8] PALAHOUANE B, KEFFOUS A, NACEUR M W, et al. Electrochemical treatment and reclamation of water used during the rinsing of silicon wafers[J]. Desalin Water Treat, 2019, 154: 320.
- [9] NDIAYE P I, MOULIN P, DOMINGUEZ L, et al. Removal of fluoride from electronic industrial effluent by RO membrane separation[J]. Desalination, 2005, 173(1): 25-32.
- [10] ZENG G S, LING B, LI Z J, et al. Fluorine removal and calcium fluoride recovery from rare-earth smelting wastewater using fluidized bed crystallization process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 373: 313-320.
- [11] 周开敏, 于跃, 张云鹏. 铅冶炼烟气净化污酸汞去除工艺应用实践[J]. 硫酸工业, 2022(2): 38-41.
- [12] 李星, 周剑雄, 李书楷, 等. 某大型冶炼厂硫化氢处理污酸应用实例[J/OL]. 工业水处理, 2025: 1-9.
- [13] 张向阳, 尹晓, 杨婉婉. 锌冶炼烟气净化污酸无害化处理工艺研究[J]. 硫酸工业, 2018(7): 31-34.
- [14] 杨光辉, 叶华, 周晓东, 等. 浓缩法除去湿法炼锌污酸中的氟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(5): 18-21.
- [15] 王水云, 李绪忠, 夏传, 等. 有色金属冶炼行业含重金属污酸处理技术应用[J]. 硫酸工业, 2021(12): 49-51.
- [16] 刘亮强, 冯永山. 含氟废水处理工艺综述[J]. 铜业工程, 2022(2): 92-95.

Front-end Defluorination Process for Waste Acid from Non-ferrous Metal Smelting Flue Gas Purification

ZHANG Min¹, LIU Shenghong², NI Jin¹, HUANG Chang¹, LIN Hanyu², CAO Leibin²

(1. Jiangxi Copper Technology Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Jinde Lead Industry Co., Ltd., Dexing 334200, China)

Abstract: To address challenges of high fluoride concentration and strong corrosivity in waste acid from nonferrous metal smelting flue gas purification, which hinder the automation of treatment processes, a novel defluorination reagent (JCFRR001) was developed. This study investigated the defluorination performance of the proposed reagent. Results showed that the reagent exhibited good adaptability under fluctuating concentrations of sulfuric acid (5~55 g/L) and fluoride ions (F^- , 5~25 g/L), achieving a consistent reduction of F^- to below 2.5 g/L in treated waste acid. Treatment of actual waste acid further demonstrated that, with initial F^- concentrations ranging from 5.6 to 18.4 g/L, the effluent F^- concentration decreased to 0.97~2.49 g/L after defluorination. Resulting fluorite slag contained 77.47%~88.21% CaF_2 by mass, meeting the FF-75 grade requirements for fluorite concentrate (YB/T 5217—2019). Moreover, the study confirmed that the front-end defluorination process had no significant impact on subsequent sulfide-based heavy metal removal process, thereby providing technical support for the automation of waste acid treatment systems.

Key words: waste acid; defluorination; fluorite powder; resource recovery; heavy metal ion

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.013

引文格式: 张敏,刘胜宏,倪金,黄昶,林汉雨,曹雷斌. 有色金属冶炼烟气净化污酸前端除氟工艺研究[J]. 铜业工程, 2026(1): 139-145.

ZHANG Min, LIU Shenghong, NI Jin, HUANG Chang, LIN Hanyu, CAO Leibin. Front-end defluorination process for waste acid from non-ferrous metal smelting flue gas purification [J]. Copper Engineering, 2026(1): 139-145.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc