

城镇给排水工程设计案例专栏

韩兆元, 韩雷, 蒋海勇, 等. 羟肟酸生产结晶母液处理工程实例及羟肟酸物料综合回收利用[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 164-170.

HAN Z Y, HAN L, JIANG H Y, et al. Engineering case of hydroxamic acid production crystallization mother liquor treatment and comprehensive recycling and utilization of hydroxamic acid materials[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 164-170.

羟肟酸生产结晶母液处理工程实例及羟肟酸物料综合回收利用

韩兆元¹, 韩雷^{2,*}, 蒋海勇², 罗云波², 张发明^{1,2,3}

(1. 广东省科学院, 广东广州 510070; 2. 广州粤有研矿物资源科技有限公司, 广东广州 510650; 3. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广东广州 510650)

摘要 【目的】羟肟酸生产结晶母液具有高盐、高化学需氧量(COD)及难降解等特点,通过羟肟酸生产结晶母液处置工程应用及黑白钨矿浮选试验以期实现其出水水质达标排放且实现羟肟酸综合利用。【方法】针对羟肟酸生产结晶母液处理难度较大、处理成本较高等问题,采用“预处理+蒸汽机械再压缩(MVR)技术蒸发+生化处理”工艺,结合规模为 $20\text{ m}^3/\text{d}$ 的羟肟酸生产结晶母液处理工程实例,对工艺设计及运行状态进行分析总结;同时,将MVR蒸发出的羟肟酸物料用于黑白钨矿浮选,以期综合回收利用。【结果】经过一年多的投产运行,羟肟酸生产结晶母液处理工程进水COD由 $1.2\times 10^5\sim 1.3\times 10^5\text{ mg/L}$ 降到出水COD质量浓度 $\leq 230\text{ mg/L}$,各项出水水质指标均满足相关要求。黑白钨矿浮选试验结果显示,当MVR蒸发出的羟肟酸物料的添加量为 $(192+96)\text{ g/t}$ 时,钨粗精矿 WO_3 回收率升高3.97%,说明MVR蒸发出的羟肟酸可有效提高钨粗精矿的回收率。【结论】通过本案例实际运行,“预处理+MVR蒸发+生化处理”工艺及羟肟酸物料浮选黑白钨矿在处理羟肟酸生产结晶母液方面具有较好的处理效果,可实现羟肟酸生产结晶母液的综合利用,对同类工程具有一定的借鉴参考意义。

关键词 羟肟酸 结晶母液 工程实践 综合回收 黑白钨矿 浮选

中图分类号: X703 文献标志码: B 文章编号: 1009-0177(2025)12-0164-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.019

Engineering Case of Hydroxamic Acid Production Crystallization Mother Liquor Treatment and Comprehensive Recycling and Utilization of Hydroxamic Acid Materials

HAN Zhaoyuan¹, HAN Lei^{2,*}, JIANG Haiyong², LUO Yunbo², ZHANG Faming^{1,2,3}

(1. Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China;

2. Guangzhou Yueyouyan Mineral Resources Technology Co., Ltd., Guangzhou 510650, China;

3. Institute of Resource Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract [Objective] The crystallization mother liquor generated during hydroxamic acid production is characterized by high salinity, elevated chemical oxygen demand (COD) levels, and poor biodegradability, through the application of the crystallization mother liquor treatment project in the production of hydroxamic acid and the flotation test of black and white tungsten ores, it is expected to achieve the standard discharge of the effluent quality and the comprehensive utilization of hydroxamic acid. [Methods] In view of the problems such as the high difficulty and cost of treating the crystallization mother liquor in the production of hydroxamic acid, a "pretreatment + mechanical vapor recompression (MVR) evaporation + biochemical treatment" process is implemented. Using a $20\text{ m}^3/\text{d}$ hydroxamic acid crystallization mother liquor treatment project as a case study, this work analyzed and summarized the

[收稿日期] 2025-08-28

[作者简介] 韩兆元(1984—),男,高级工程师,主要从事选矿技术开发及管理等工作,E-mail:15989003469@126.com。

[通信作者] 韩雷(1987—),男,工程师,主要从事选矿药剂与工艺开发及相关水处理等工作,E-mail:489449170@qq.com。

process design and operational performance. Additionally, the hydroxamic acid material recovered from MVR evaporation was utilized for black and white tungsten flotation to achieve resource recovery. [**Results**] After over a year of operation, the influent COD is reduced from 120 000—130 000 mg/L to ≤ 230 mg/L in the effluent, meeting all relevant discharge standards. Black and white tungsten flotation experiments demonstrated tha the addition of (192+96) g/t of hydroxylamide material evaporated by MVR the recovery rate of WO_3 in tungsten crude concentrate by 3.97%, indicating that hydroxylamide evaporated by MVR can effectively improve recovery rate of tungsten crude concentrate. [**Conclusion**] Through the actual operation of this case, the " pre-treatment + MVR evaporation + biochemical treatment " process and the hydroxamic acid material flotation of black and white tungsten ore have shown good treatment effects in dealing with the crystallization mother liquor from hydroxamic acid production. This can achieve comprehensive utilization of the crystallization mother liquor from hydroxamic acid production and provide certain reference significance for similar projects.

Keywords hydroxamic acid crystallization mother liquor engineering practice comprehensive recycling black and white tungsten flotation

羟肟酸类捕收剂由于其极性基团中的氧和氮能够与钨、锡、铁、钛、钽、铌及稀土等金属阳离子发生配位反应,形成稳定的四元或五元环金属螯合物并吸附在矿物表面,故而被广泛应用于矿物的浮选过程中^[1-3]。其制备以羟胺-酯法为主,生产过程中每吨产品通常产生 1.2~1.5 t 结晶母液^[4-7]。由于该结晶母液成分复杂,除含有高浓度无机盐外,还含有未完全反应的原料、反应副产物及少量羟肟酸,使其处理难度大、成本高。同时,随着环保要求日益严格,该结晶母液的处理及其对水环境的影响带来了越来越大的压力,已成为选矿药剂生产行业发展的重大瓶颈^[8-9]。羟肟酸生产结晶母液目前尚未有较好的处理方法,其实质上是一种高盐有机废水,故而可采用蒸发法、生物法、吸附法、高级氧化法、萃取法及冷冻工艺等方法处理^[10-19]。本文针对羟肟酸生产结晶母液的特点,通过研究某选矿药剂企业生产中产生的羟肟酸生产结晶母液的实际处理案例,探索了羟肟酸生产结晶母液处理工艺及资源化综合利用的方法,旨在为类似企业提供参考。

1 工程概况

广东某选矿药剂公司年产 1 500 t 羟肟酸类系列捕收剂,其生产工艺主要为酯化、肟化、结晶 3 个工段,生产过程中使用了大量的苯甲酸甲酯、羟胺、氢氧化钠、浓硫酸等。结晶所得固相为主产品——羟肟酸,滤液通常称作羟肟酸生产结晶母液,该生产结晶母液中含有溶解态的羟肟酸、甲醇、未反应完全的原料、氯化钠及硫酸钠等,化学需氧量(COD)高达 13 万 mg/L,其成分较为复杂,有机物浓度及盐含量较高。针对该羟肟酸生产结晶母液,需对水质进行预处理,通过机械式蒸汽再压缩(MVR)技术去除

其中的盐分及部分羟肟酸物料以实现资源化回收利用,同时再结合生化强处理,使出水水质符合企业所在工业园污水处理厂进水标准。

2 设计水质及水量

本工程废水主要来源为羟肟酸生产过程中产生的羟肟酸生产结晶母液及生活污水等,设计处理规模为 20 m³/d,出水水质达到企业所在工业园污水处理厂进水标准。设计进出水水质如表 1 所示。

表 1 设计进出水水质
Tab. 1 Design of Influent and Effluent Quality

项目	COD/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	pH 值	总盐度
进水	140 000	32 000	0.30	2~5	20%
出水	≤ 230	≤ 20	≤ 2	6~9	$\leq 0.1\%$

3 处理工艺

3.1 工艺选择

该工程羟肟酸生产结晶母液主要污染物包括 COD、氨氮、盐,pH 为酸性,需要按照分级处理的原则进行处理。污染物 pH 值为 2~5,酸性较强,需作预处理将其调至中性,以减轻后续工艺对设施设备的压力;污染物中总盐度在 20%左右,盐分含量较高,高盐会抑制活性污泥中微生物的活性,并改变其细胞表面电荷、疏水性以及絮凝性,从而影响活性污泥的理化性能,对微生物的冲击较强,故而必须去除盐分再进行生化处理。MVR 蒸发工艺是目前国际先进的新型高效节能蒸发技术,根据羟肟酸生产结晶母液特点及 MVR 蒸发的优势,本工程采用 MVR 蒸发工艺去除盐分。去除盐分后的 MVR 冷凝水中含有苯环类难降解有机物,生物毒性较大,故而生化

处理时设计了厌氧折流板反应器(ABR)厌氧池—好氧池—沉淀池—曝气生物滤池(BAF)逐级降解的措施,以保证污染物中有机物的充分降解。

为评估“预处理+MVR蒸发+生化处理”工艺处理羟肟酸生产结晶母液的效果,探索该工艺在本工程中的应用效力。本工程设计了蒸发及生化处理2组小试试验,分别进行工业上MVR蒸发与生化处理模拟,其中MVR冷凝水在ABR厌氧池、好氧池及

BAF池停留时间分别为8、6 d及20 h。蒸发+生化处理试验结果如表2所示。由表2可知,羟肟酸生产结晶母液经MVR蒸发模拟处理后COD去除率为78.50%,经ABR厌氧池处理后COD去除率为92.59%,经好氧池处理后COD去除率为88.68%,经BAF池处理后COD去除率为64.58%,最后BAF池出水COD质量浓度为85 mg/L,pH值为6~9,满足工业园区污水处理厂进水标准。

表2 蒸发+生化处理试验结果

Tab. 2 Results of Evaporation and Biochemical Treatment Experiment

项目		原水池	MVR 冷凝水	ABR 厌氧池	好氧池	BAF 池	标准
COD/(mg·L ⁻¹)	进水	133 000	133 000	28 600	2 120	240	
	出水	133 000	28 600	2 120	240	85	≤230
	去除率		78.50%	92.59%	88.68%	64.58%	
pH 值	进水	3	6~9	6~9	6~9	6~9	
	出水	6~9	6~9	6~9	6~9	6~9	6~9

3.2 工艺流程

本工程工艺流程如图1所示,针对羟肟酸生产结晶母液水质特点,先经过调节、中和使废水呈中性,再进入MVR蒸发设备去除盐分及部分羟肟酸,MVR冷凝水中主要有机物为羟肟酸、甲醇和苯甲酸,COD质量浓度仍然高达30 000~50 000 mg/L,生化法在深度处理和成本效益方面优势显著,蒸发出的冷凝水自流进入冷凝水收集池,在正常生

产时,其水力停留时间大于24 h,通过水泵,将收集池的冷凝水泵入ABR厌氧池,再依次通过好氧池、沉淀池、BAF池处理,分级降解COD及氨氮,最后通过清水池达标排放。“预处理+MVR蒸发+生化处理”组合工艺可确保废水处理稳定达标,而且可以满足将来进一步升级改造的要求。MVR蒸发出的盐含有羟肟酸物料,可用于矿物的浮选,以实现资源化综合利用。

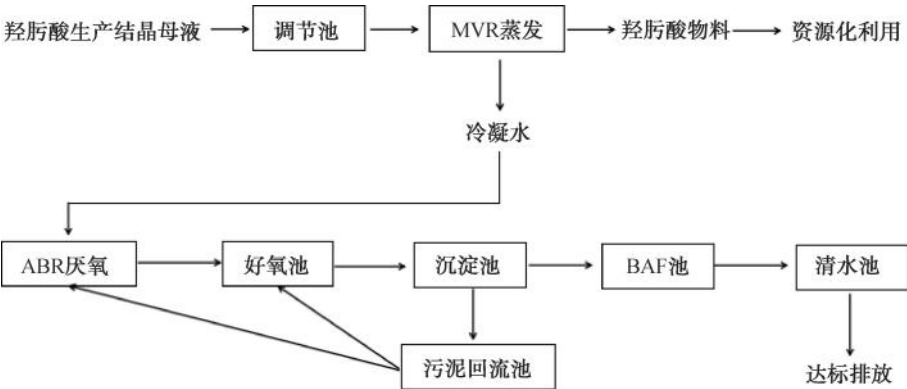


图1 羟肟酸生产结晶母液处理及综合利用工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Treatment and Comprehensive Utilization of Crystallization Mother Liquor in Hydroxamic Acid Production

3.3 设计特点

本工程设计过程中根据分级处理的原则对羟肟酸生产结晶母液进行处理。污染物中的高盐采用MVR蒸发工艺进行去除,去除的盐分中含有少量的

羟肟酸物料,可用于矿物的浮选,以实现羟肟酸物料的综合回收利用。MVR蒸发技术在运行过程中,会出现结垢、堵塞等问题,针对结垢现象,配制了专用的酸性清洗液,在MVR不停机的情况下,将酸性清

洗液打入系统进行循环,溶解和剥离污垢,清洗完成后,排掉酸性清洗液,重新进料运行,可延长连续运行时间。针对堵塞问题,在前端预处理时通过过滤去除或减少悬浮固体和易结垢离子,MVR 运行过程中结合沸点升高的实际情况判断物料浓度,通过延长排料时间及加快排料频率以提高盐的排出量,确保 MVR 能稳定运行。针对 MVR 蒸馏水,采用 ABR 厌氧池—好氧池—沉淀池—BAF 池逐级降解的措施,分级降解 COD、氨氮等污染物,为废水达标排至企业所在工业园污水处理厂进水标准提供保障。羟肟酸生产结晶母液经“预处理+MVR 蒸发+生化处理”工艺处理后,不仅能保证废水能达到工业园污水处理厂进水接管标准,还可实现羟肟酸物料的资源化利用,符合绿色环保的标准。

4 主要建筑物设计参数及设备配置

(1) 预处理调节池 1 座,尺寸为 $10.00\text{ m} \times 3.00\text{ m} \times 2.50\text{ m}$,结构为地下钢筋混凝土,有效容积为 72 m^3 ,配备机械搅拌机 1 套、pH 调节系统 1 套及在线 pH 检测仪 1 台,另外配置提升泵各 1 台,流量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 15 m 。

(2) MVR 蒸发设备 1 套,包括压缩机系统、泵、轴封水系统、固液分离系统、蒸汽发生器、软化水器、传感器与仪表及电控系统等,与羟肟酸生产结晶母液接触的高温部分均采用钛材,其他接触部分采用 316 L/304 不锈钢材质。该设备设计进水量为 $1.2 \sim 1.4\text{ m}^3/\text{h}$,蒸发量为 $0.8 \sim 1.0\text{ m}^3/\text{h}$ (确保至少为 $0.8\text{ m}^3/\text{h}$),蒸发结晶物料含水率 $\leq 20\%$ 。压缩机系统包括罗茨蒸汽压缩机 1 套,过气量为 $1\,000\text{ kg/h}$,温升为 $20\text{ }^\circ\text{C}$;配套电机 1 台,功率为 110 kW ,变频器 1 台,功率为 110 kW ,压缩机进口温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$,出口温度为 $110\text{ }^\circ\text{C}$;分离器 1 台,规格为 $\phi 800\text{ mm} \times 2\,500\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,带盐腿,含两级除雾装置;列管式强制循环蒸发器 1 台,换热面积为 110 m^2 ,换热管尺寸为 $\phi 32\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 5\,000\text{ mm}$ 。泵包括排水泵 1 台,流量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 20 m ,功率为 0.75 kW ;循环泵 1 台,流量为 $350\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 7 m ,功率为 18.5 kW ;出料泵 1 台,流量为 $5\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 25 m ,功率为 5.5 kW 。轴封水系统包括板式换热器 2 台,换热面积为 1 m^2 ;储水罐 2 台,容量为 200 L ;轴封水泵 2 台,流量为 $5\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 28 m ,功率为 1.1 kW 。固液分离系统包括稠化器 1 台,规格为

$2\,000\text{ L}$;冷却搅拌器;自动卸料离心机 1 台,型号为 HR400-N 型卧式双级活塞推料离心机;母液泵 1 台,流量为 $3\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 30 m ,功率为 2.2 kW 。蒸汽发生器 1 台,产气量为 100 kg/h ,功率为 72 kW ;软化水器 1 套,流量为 0.5 t/h 。

(3) 生化处理设施 1 座,包括 ABR 厌氧系统、好氧系统、沉淀系统、下流式 BAF 系统及清水池等,均为地面建筑,钢筋混凝土结构,设计生化处理量为 $1.0 \sim 1.4\text{ m}^3/\text{h}$ (确保至少为 $1.0\text{ m}^3/\text{h}$),出水 COD 质量浓度 $\leq 230\text{ mg/L}$ 。其中:ABR 厌氧池 5 座,尺寸为 $4.00\text{ m} \times 3.00\text{ m} \times 5.00\text{ m}$,配套提升泵 2 台,流量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 15 m ,组合填料 5 套;好氧池 2 座,尺寸为 $4.00\text{ m} \times 4.00\text{ m} \times 5.00\text{ m}$,组合填料 2 套;沉淀池 1 座,尺寸为 $4.00\text{ m} \times 4.00\text{ m} \times 5.00\text{ m}$;下流式 BAF 池 1 座,尺寸为 $2.80\text{ m} \times 2.00\text{ m} \times 5.00\text{ m}$,BAF 滤料一批, 16 m^3 ;污泥回流池 1 个,尺寸为 $4.00\text{ m} \times 1.50\text{ m} \times 5.00\text{ m}$;清水池 1 座,尺寸为 $6.00\text{ m} \times 4.00\text{ m} \times 5.00\text{ m}$ 。生化处理系统配套曝气风机 4 台,其中 2 台风量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$,风压为 0.6 MPa ,另外 2 台风量为 $100 \sim 200\text{ m}^3/\text{h}$,风压为 0.6 MPa ;污泥回流泵 3 台,流量为 $10 \sim 15\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 5 m ;污泥回流流量计 3 支,量程为 $10 \sim 20\text{ m}^3/\text{h}$;风机变频器 2 台;可编程序控制器(PLC)系统 1 套,就地控制柜 1 套。

5 运行效果

本工程建设完成后 2023 年 3 月开始试运行,试运行期间系统运行稳定,耐冲击负荷,系统出水水质符合企业所在工业园污水厂进水标准。2023 年 6 月开始正式运行,投产后实际出水水质如表 3 所示。经过 1 年投产运行,进水 COD 质量浓度由 $1.2 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^5\text{ mg/L}$ 降到出水 COD 质量浓度 $< 230\text{ mg/L}$,出水水质氨氮、总磷(TP)、pH、总盐度等指标均满足所在工业园污水厂进水要求。

6 技术经济分析

本项目建设总投资为 445 万元,包括预处理、MVR 和生化设备材料、土建与安装、设计与技术服务。项目运行以来,处理羟肟酸生产结晶母液 $20\text{ m}^3/\text{d}$ ，“预处理+MVR 蒸发+生化处理”工艺方案在技术和经济上可行。总运行处理成本为 $195.73\text{ 元}/\text{m}^3$,其中电耗成本为 $177.73\text{ 元}/\text{m}^3$,人工成本 $9\text{ 元}/\text{m}^3$,碱液等耗材费用 $2\text{ 万元}/\text{a}$ 。

表 3 “预处理+MVR 蒸发+生化处理”工艺 2023 年 6 月—2024 年 5 月出水 COD 结果
Tab. 3 COD Results of Effluent by "Pretreatment+MVR Evaporation+Biochemical Treatment"
Process from June 2023 to May 2024

月份	原水池/(mg·L ⁻¹)	蒸馏水/(mg·L ⁻¹)	厌氧出水/(mg·L ⁻¹)	沉淀池出水/(mg·L ⁻¹)	清水池/(mg·L ⁻¹)
2023 年 6 月	131 940	36 720	4 063	376	123
2023 年 7 月	130 820	39 878	4 327	340	127
2023 年 8 月	136 500	43 282	3 869	358	129
2023 年 9 月	135 760	44 120	4 215	386	147
2023 年 10 月	132 100	45 532	4 026	380	160
2023 年 11 月	128 480	38 928	3 396	402	191
2023 年 12 月	130 160	41 716	3 682	416	196
2024 年 1 月	129 620	39 962	3 582	392	167
2024 年 2 月	124 700	38 580	3 910	360	221
2024 年 3 月	132 060	40 258	4 527	386	202
2024 年 4 月	127 180	37 612	3 825	372	195
2024 年 5 月	123 520	35 178	4 120	366	183

7 羟肟酸物料综合回收利用试验

MVR 蒸发出的盐中含有一定的羟肟酸,可添加至羟肟酸产品中用于矿物浮选,具有综合回收利用价值。本文以湖南某黑白钨矿为例,进行了 MVR 蒸发出的羟肟酸物料用于黑白钨的浮选试验, m (白钨矿): m (黑钨矿)约为 2.5:1, WO_3 品位为 0.35%, -0.074 mm 粒级占比为 65.28%。原矿多元素化学分析结果如表 4 所示。

表 4 原矿多元素化学分析结果
Tab. 4 Results of Multi-Element Chemical Analysis for Raw Ore

物质	质量分数	物质	质量分数
WO_3	0.35%	CO_2	3.63%
Fe	9.64%	Bi	0.097%
S	0.94%	Pb	0.018%
K_2O	1.03%	Zn	0.021%
Na_2O	0.32%	MgO	1.13%
Al_2O_3	5.63%	TiO_2	0.16%
SiO_2	29.54%	Ag	7.37%
CaO	23.36%	Cu	0.05%
CaF_2	18.71%	Mn	0.042%

原矿样经硫化矿浮选后硫尾矿作为钨浮选给矿,加入 400 g/t 碳酸钠调 pH 值至 10 左右,2 000 g/t 水玻璃与 400 g/t 硫酸铝为抑制剂,400 g/t 硝酸铅作为调整剂,以 GYB(药剂名称)、羟肟酸物料及

GYR(药剂名称)为捕收剂,进行一次粗选一次扫选,考查了不同羟肟酸物料用量条件下黑白钨矿的浮选性能,黑白钨矿浮选工艺流程如图 2 所示,试验结果如表 5 所示。

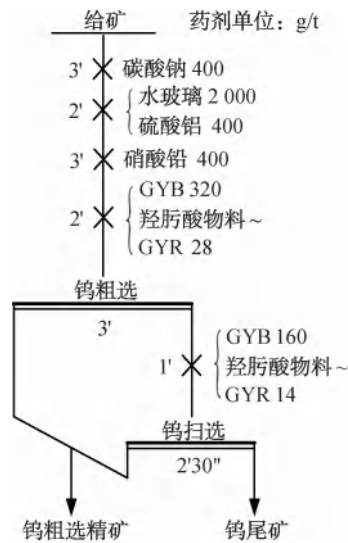


图 2 黑白钨矿浮选工艺流程

Fig. 2 Flotation Process of Black and White Tungsten

由表 5 试验结果可知,不添加羟肟酸物料时,钨粗精矿 WO_3 回收率为 82.52%;添加羟肟酸物料时,随着添加羟肟酸物料的增多,钨粗精矿 WO_3 回收率呈现上升的趋势。添加羟肟酸物料钨粗选 192 g/t 和扫选 96 g/t 时,钨粗精矿 WO_3 回收率升高 3.97%。试验结果表明:可将羟肟酸物料与 GYB 混

合作为产品用于黑白钨矿浮选,相对于单纯的 GYB 而言,羟肟酸物料的添加有利于提高钨粗精矿回收率,可综合回收利用。

表 5 羟肟酸物料用量试验结果

Tab. 5 Test Results of Hydroxamic Acid Material Consumption

羟肟酸物料钨 粗选+扫选/t	产品名称	产率	WO ₃ 品位	WO ₃ 回收率
0	钨粗精矿	12.62%	2.289%	82.52%
	钨粗选尾矿	87.38%	0.070%	17.48%
	给矿	100.00%	0.350%	100.00%
64+32	钨粗精矿	12.83%	2.300%	84.31%
	钨粗选尾矿	87.17%	0.063%	15.69%
	给矿	100.00%	0.350%	100.00%
128+64	钨粗精矿	13.12%	2.277%	85.35%
	钨粗选尾矿	86.88%	0.059%	14.65%
	给矿	100.00%	0.350%	100.00%
192+96	钨粗精矿	14.01%	2.161%	86.49%
	钨粗选尾矿	85.99%	0.055%	13.51%
	给矿	100.00%	0.350%	100.00%

8 结语

(1)工程实践表明:采用“预处理+MVR 蒸发+生化处理”工艺处理羟肟酸生产结晶母液具有较好的处理效果,可实现羟肟酸生产结晶母液的处置,出水 COD 质量浓度可稳定小于 230 mg/L,出水水质指标均满足相关要求。

(2)处理规模为 20 m³/d 的羟肟酸生产结晶母液的处理工程,项目投资为 445 万元,运行处理成本较为经济,运行处理成本为 195.73 元/m³。

(3)MVR 蒸发回收的羟肟酸物料添加至羟肟酸产品中用于黑白钨矿浮选,能有效提高钨粗精矿回收率,可综合回收利用。

(4)采用“预处理+MVR 蒸发+生化处理”工艺有效解决了羟肟酸生产结晶母液水排放问题,实现了羟肟酸物料的资源化利用,这对该类型企业而言不仅能减少环境污染,实现降本增效,还可推动企业绿色转型。

参考文献

- [1] 薛春丽,李志红,郝波,等. 羟肟酸类捕收剂对煤系石英浮选的机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(10): 248-256.
- XUE C L, LI Z H, HAO B, et al. Study on the mechanism of

hydroxamic acid collectors on coal-series quartz flotation[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(10): 248-256.

- [2] YAO X, YU X Y, WANG L P, et al. Preparation of cinnamic hydroxamic acid collector and study on flotation characteristics and mechanism of scheelite[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(6): 773-781.
- [3] 孙文豪,蒋昊,徐艳玲,等. 组合羟肟酸下方解石和萤石中浮选氟碳铈矿的分离机理[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(2): 611-624.
- SUN W H, JIANG H, XU Y L, et al. Separation mechanism of bastnaesite flotation from calcite and fluorite with combined hydroxamic acid[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(2): 611-624.
- [4] 梁毅,姚旗升,谢鸿辉,等. 苯丙烯基羟肟酸捕收剂浮选某萤石矿试验研究[J]. 非金属矿, 2024, 47(2): 63-67.
- LIANG Y, YAO Q S, XIE H H, et al. Experimental study on the flotation of a fluorite ore with phenylacrylic hydroxamic acid collector[J]. Non-Metallic Minerals, 2024, 47(2): 63-67.
- [5] 李亚民,黄凌云,孙鑫,等. 新型羟肟酸捕收剂对硅孔雀石的浮选机理研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(2): 69-76.
- LI Y M, HUANG L Y, SUN X, et al. Study on flotation mechanism of silico-malachite by a new hydroxamic acid collector[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(2): 69-76.
- [6] 曾勇,程恺,韩海生,等. 苯甲羟肟酸在浮选中的应用及作用机理研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(3): 877-898.
- ZENG Y, CHENG K, HAN H S, et al. Research progress on application and mechanism of benzohydroxamic acid in flotation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(3): 877-898.
- [7] 代龙富,刘建,李达,等. 基于苯甲羟肟酸的三元组合捕收剂高效浮选白钨矿研究及分子动力学模拟[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(3): 49-56.
- DAI L F, LIU J, LI D, et al. Research and molecular dynamics simulation of efficient flotation of scheelite with ternary combined collector based on BHA[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(3): 49-56.
- [8] 韩雷,张发明,罗云波,等. 萃取-Fenton 氧化组合工艺高效处理羟肟酸类选矿药剂生产废水研究[J]. 当代化工, 2024, 53(11): 2689-2692, 2719.
- HAN L, ZHANG F M, LUO Y B, et al. Study on high-efficient treatment of hydroxamic acid wastewater by extraction combined with Fenton oxidation technology[J]. Contemporary Chemical Industry, 2024, 53(11): 2689-2692, 2719.
- [9] 汪东芳,刘如春,韩梦婷,等. 氰化尾渣制备铁碳微电解填料降解苯甲羟肟酸废水[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(7): 110-116.
- WANG D F, LIU R C, HAN M T, et al. Preparation of iron-carbon micro-electrolysis from cyanide tailings and its degradation

- performance for benzohydroxamic acid wastewater[J]. *Nonferrous Metals (Smelting Part)*, 2023(7): 110-116.
- [10] 陈群云, 于幸娟, 吴志根. 曝气式增湿除湿蒸发工艺处理高盐废水的模拟分析与优化[J]. *水处理技术*, 2024, 50(2): 31-37.
- CHEN Q Y, YU X J, WU Z G. Simulation and optimization analysis of aeration-based humidification dehumidification evaporation process for high salinity wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(2): 31-37.
- [11] KALTOUM B, LEKBIRA E M, MOHAMMED-AMINE E, et al. Cheese wastewater treatment through combined coagulation-flocculation and photo-Fenton-like advanced oxidation processes for reuse in irrigation: Effect of operational parameters and phytotoxicity assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(8): 11801-11814.
- [12] 周欣玮, 符祥壮, 郭梦霞, 等. 异化铁还原“电”耦合甲烷化处理蛋白质有机废水[J]. *工业水处理*, 2024, 45(6): 167-178.
- ZHOU X W, FU X Z, GUO M X, et al. Treatment of protein-containing organic wastewater by “electrical” collaboration between dissimilatory iron reduction and methanogenesis [J]. *Industrial Water Treatment*, 2024, 45(6): 167-178.
- [13] 卓佐西, 徐颜军, 刘春红, 等. 影响活性炭吸附处理高盐有机废水性能的结构因素探究[J]. *工业水处理*, 2023, 43(7): 144-151.
- ZHUO Z X, XU Y J, LIU C H, et al. Study on structural factors affecting the adsorption treatment performance of activated carbon for high salt organic wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(7): 144-151.
- [14] 赵瑞强, 周鑫, 牛冰心. 废水处理硝酸盐异化还原与厌氧氨氧化/反硝化耦合工艺构建[J]. *化工进展*, 2024, 43(3): 1593-1605.
- ZHAO R Q, ZHOU X, NIU B X. Construction of a coupled process integrating dissimilatory nitrate reduction and anaerobic ammonia oxidation/denitrification for wastewater treatment [J]. *Chemical Industry Engineering Progress*, 2024, 43(3): 1593-1605.
- [15] ALNAHHAL S Y, ELFARI A A, ALJUBB A A E R. Using slow sand filter for organic matter and suspended solids removal as post-treatment unit for wastewater effluent [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2024, 10(2): 490-497.
- [16] 周楠, 李亮, 马璐, 等. 高盐有机废水处理技术研究进展[J]. *现代化工*, 2024, 44(1): 74-77.
- ZHOU N, LI L, MA L D, et al. Research progress on treatment technology for organic wastewater with high salinity[J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(1): 74-77.
- [17] 武诗宇, 杜志平, 申婧, 等. 生物电芬顿系统在废水处理中的研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(11): 5929-5942.
- WU S Y, DU Z P, SHEN J, et al. Treatment of wastewater by bio-electro-Fenton system: A review [J]. *Chemical Industry Engineering Progress*, 2023, 42(11): 5929-5942.
- [18] MEHTA P, CHELIKE D K, RATHORE R K. Adsorption-based approaches for exploring nanoparticle effectiveness in wastewater treatment[J]. *Chemistry Select*, 2024, 9(25): 2-16.
- [19] 池伟利, 杨宏. 厌氧氨氧化包埋填料处理稀土尾矿废水的中试脱氮和优化[J]. *化工进展*, 2024, 42(1): 506-516.
- CHI W L, YANG H. Pilot-scale nitrogen removal and optimization of anammox immobilized fillers in the treatment of rare earth tailings wastewater[J]. *Chemical Industry Engineering Progress*, 2024, 42(1): 506-516.

(上接第 108 页)

- [15] 冯淋淋. 垃圾焚烧厂渗沥液浓缩液回用技术研究[J]. *环境卫生工程*, 2019, 27(5): 53-56.
- FENG L L. Research on the reuse technology of leachate concentrate in waste incineration plant [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2019, 27(5): 53-56.
- [16] 陈子华. 垃圾焚烧发电厂废水“零排放”技术及工程案例分析[J]. *净水技术*, 2022, 41(7): 99-105.
- CHEN Z H. “Zero discharge” technology and engineering case analysis of wastewater treatment of solid waste incineration power plants [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(7): 99-105.
- [17] 赵玉军. 碟管式反渗透膜处理垃圾渗滤液膜污染控制分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- ZHAO Y J. Analysis on membrane pollution control of landfill leachate treated by disc tube reverse osmosis membrane [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [18] 张书国. 碱度和垃圾渗滤液反硝化反应关系的研究[J]. *当代化工研究*, 2024(10): 53-55.
- ZHANG S G. Study on the relationship between alkalinity and denitrification of landfill leachate [J]. *Modern Chemical Research*, 2024(10): 53-55.