

铅锌冶炼废水脱盐零排放工程实例

夏 传¹, 刘 双², 李绪忠¹, 王 杰¹, 李运龙¹

(1. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014;

2. 长沙华时捷环保科技发展股份有限公司, 湖南长沙 410205)

[摘要] 以云南某铅锌冶炼厂废水脱盐工程为例, 从废水特点、设计参数、工艺流程、物料平衡、运行效果等角度出发, 对脱钙软化+膜浓缩+蒸发结晶的脱盐零排放综合工艺进行介绍。其中, 脱钙软化工序采用 CO_2+NaOH 脱除硬度; 膜浓缩工序采用高压海淡膜+碟管式反渗透浓缩, 辅以中低压卷式膜对产水进行脱盐淡化; 蒸发结晶工序采用硫酸钠三效结晶+冷冻结晶+氯化钠单效结晶+杂盐干燥进行盐硝分离。脱钙软化生成的碳酸钙渣可用作铅锌冶炼原污酸处理的中和剂, 不产生固废。该工程产水水质优于设计要求, 总溶解性固体 11~23 mg/L、总硬度(以 CaCO_3 计) 2~5 mg/L、电导率 20.2~34.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 膜浓缩系统回收率 $\geq 85\%$ 、脱盐率 $\geq 99\%$, 出水回用可显著改善全厂水质。该工程自投产以来运行稳定, 产水水质良好, 且实现盐硝分离, 结晶盐质量分数均 $\geq 92\%$, 并以产品盐外售, 扣减收益后运行费用为 18.26 元/ m^3 。

[关键词] 铅锌冶炼废水; 膜浓缩; 多效蒸发; 脱盐; 零排放

[中图分类号] X703; TU992.3 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)04-0164-06

Engineering example of desalination zero-discharge of lead and zinc smelting wastewater

XIA Chuan¹, LIU Shuang², LI Xuzhong¹, WANG Jie¹, LI Yunlong¹

(1. CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410014, China;

2. Changsha Hasky Environmental Protection Technology Development Co., Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: Taking the wastewater desalination project of a lead-zinc smelting plant in Yunnan Province as an example, the zero-discharge desalination process of decalcification softening+membrane concentration+evaporation crystallization was introduced from the perspectives of wastewater characteristics, design parameters, process flow, material balance and operation effect. CO_2+NaOH was used to remove hardness in the decalcification softening process. RO1+DTRO concentration was used in membrane concentration process, supplemented by RO2 for desalination of produced water. Sodium sulfate tri-effect crystallization+freezing crystallization+sodium chloride single-effect crystallization+mixed salt drying was used in the evaporation crystallization process for sodium sulfate and sodium chloride separation. Calcium carbonate slag generated from the decalcification and softening could be used as a neutralizer for raw acid treatment of lead and zinc smelting, and no solid waste was generated. The water quality of produced water was better than the design requirements, including 11~23 mg/L total dissolved solids, 2~5 mg/L total hardness in CaCO_3 , 20.2~34.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ conductivity. Recovery rate of membrane concentration $\geq 85\%$, desalination rate $\geq 99\%$. The effluent reuse could significantly improve the water quality of the whole plant. The project has been running steadily since it was put into operation, with good water quality and sodium sulfate-sodium chloride separation. The crystalline salt mass fraction was more than 92% and was sold out as product salt. The operating cost was 18.26 yuan/ m^3 after deduction of return.

Key words: lead-zinc smelting wastewater; membrane concentration; multi-effect evaporation; desalination; zero-discharge

根据《有色金属工业发展规划(2016—2020)》,2020年末我国铅锌产量达1 175万t,结合铅锌工业废水估算系数,废水排放量达6 400万t/a,废水外排造成严重的环境污染和水资源浪费^[1-2]。目前,山东、广西、河北、辽宁等省份将废水中的总溶解性固体(TDS)和氯化物列入排放指标并明确限值,但传统的处理工艺无法达到限值要求,废水外排问题亟待解决^[3]。

铅锌冶炼废水多采用石灰(石)中和、石灰铁盐除砷、硫化除重金属等常规处理方法,出水为高盐高硬度废水^[4-5],仅能低水质回用,且极易造成管道及设备结垢。累积回用时使盐分积聚引起设备腐蚀,逐渐不满足回用要求,打破全厂水平衡,甚至造成停产。

千万量级的铅锌冶炼废水经传统方法处理后无法回用又限制外排,因此研究发展铅锌冶炼废水零排放势在必行。国内对工业废水零排放曾有报道^[6-7],但关于废水深度脱盐及盐硝分离则鲜有报道。笔者以云南某铅锌冶炼厂的废水处理工程为例,对原达标外排的废水进行脱盐处理并回用,旨在为铅锌冶炼废水脱盐零排放提供一种解决方案,具有明显的环境效益。

1 工程概况

该工程于2020年3月开工建设,2020年12月调试并投入运行。原废水处理站采用石灰中和+石灰铁盐法处理工艺。该工程进水主要来自原废水处理站出水、循环水系统排污水,工程设计规模为800 m³/d,330 d/a,处理出水全部回用。

工程进水按《铅、锌工业污染物排放标准》(GB 25466—2010)表2限值控制,出水满足《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)中表6.1.3限值。主要进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Table 1 Designed influent and effluent water quality										
项目	pH	COD _{Cr}	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	总硬度	TDS	电导率	
进水	10	40	3 065	1 704	5 340	510	1 275	10 713	17 142	
出水	6~9	≤10	—	—	—	≤20	≤50	≤150	≤250	

注:除pH、电导率(μS/cm)外,其余项目单位均为mg/L,总硬度以CaCO₃计。

2 工艺流程及说明

2.1 工艺流程

针对废水特点和处理要求,采用脱钙软化+膜浓缩+蒸发结晶的综合处理工艺。脱钙软化工序采

用CO₂+NaOH去除硬度;膜浓缩工序采用高压海淡膜(RO1)+碟管式反渗透(DTRO)浓缩,辅以中低压卷式反渗透(RO2)对RO1、DTRO产水进行脱盐淡化;蒸发结晶工序采用硫酸钠三效结晶+冷冻结晶+氯化钠单效结晶+杂盐干燥进行盐硝分离。处理工艺如图1所示。

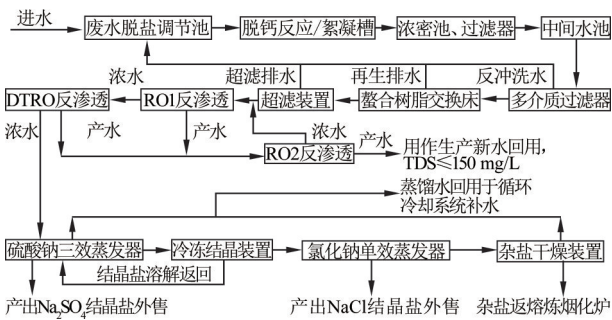


图1 工艺流程

Fig. 1 Technological process

2.2 工艺流程说明

2.2.1 脱钙软化工序

进水在废水脱盐调节池均质均量,加压提升至脱钙反应槽/絮凝槽,向反应槽内投加NaOH调节pH至10~11,经CO₂曝气生成碳酸钙沉淀^[8],向絮凝槽投加HPAM混凝形成致密矾花,经浓密池、过滤器固液分离,出水自流入中间水池。HPAM为线性有机高分子,分子链的酰胺基和羧基易形成氢键,吸附作用强;此外,基团间的静电排斥可使聚合链伸展,发挥优异的吸附架桥和网捕卷扫作用^[9-10]。

该工程采用自动化程度高、劳动强度低的CO₂+NaOH脱硬,可适量降低后续工序的盐负荷^[8],其中钙降至60 mg/L,总硬度去除率为85%。脱钙软化出水进入膜浓缩工序,碳酸钙沉淀返回原废水处理站,用作铅锌冶炼污酸中和剂,不产生固废,节约药剂费。

2.2.2 膜浓缩工序

中间水池存水加压后依次经过多介质过滤器、树脂交换床、超滤装置,使出水浊度<0.5 NTU、SDI≤3、总硬度≤10 mg/L,进一步去除致浊物质,深度脱除硬度物质,可改善反渗透膜浓水侧的结垢污堵程度,减少膜清洗频次,延长使用寿命^[11]。超滤产水经加压进入RO1反渗透浓缩,浓水加压进入DTRO高压浓缩,RO1及DTRO产水进入RO2脱盐,RO2产出的脱盐淡水回用于生产,RO2浓水回流至RO1,DTRO

的高盐浓水进入蒸发结晶工序。

离子交换采用螯合树脂,即大孔结构丙烯酸共聚体带有羧酸基的阳离子交换树脂,适于高盐水,具有工作交换容量高、低离子泄漏值、机械强度优良等优点,保证树脂交换稳定性^[12],其中钙降至10 mg/L,总硬度去除率为83%。RO1设计为一级两段、段间增压,一段膜元件6×6、二段6×3,设计回收率(R)≥70%、脱盐率≥97%,进水压力4.5 MPa、TDS 9.78 g/L,浓水TDS 31.9 g/L,产水0.42 g/L。DTRO适用于COD>80 mg/L、卷式膜无法进一步浓缩的浓水反渗透,通过湍流避免膜堵塞和浓度极化现象,可拆卸清洗膜片,运行稳定^[13]。DTRO设计2套并联,设计 R ≥61%、脱盐率≥97%,进水压力9 MPa、TDS 31.9 g/L,浓水TDS 78.3 g/L,产水1.58 g/L。RO2设计为一级两段、段间增压,一段膜元件6×5、二段6×3,设计 R ≥75%、脱盐率≥97%,进水压力1.6 MPa、TDS 0.7 g/L,浓水TDS 2.6 g/L,产水≤150 mg/L。

RO1、DTRO产水TDS受反渗透膜回收率和脱盐率的限制,特别是高进水TDS,使产水TDS偏高,仅适于低水质回用。因此,采用RO2低压膜对RO1、DTRO产水进行脱盐处理,产水TDS低至26.2 mg/L,可实现深度脱盐淡化。

2.2.3 蒸发结晶工序

DTRO浓水经换热升温进入三效加热、分离器蒸发浓缩,形成的硫酸钠结晶饱和液依次经过稠厚器、固液分离器、流化床,干燥、打包得到无水硫酸钠盐;随着三效母液中氯化钠的富集,母液输送至冷冻系统,析出十水硫酸钠,溶解返回硫酸钠三效结晶系统;冷冻母液进入单效加热、分离器蒸发浓缩,形成的氯化钠结晶饱和液依次经脱水、干燥、打包得到氯化钠盐;单效母液进入杂盐干燥装置,形成以氯化钠、硫酸钠为主的少量杂盐,返回厂区熔炼烟化炉处理。

火法铅锌冶炼有富裕低压蒸汽,采用多效蒸发器投资较省,可补充生蒸汽从而不影响蒸发量,保证运行稳定^[14]。该工程蒸发结晶工序物料见表2,结合物料平衡计算可知,废水中的 Na_2SO_4 含量高于NaCl,蒸发浓缩先析出 Na_2SO_4 晶体,再冷冻结晶析出 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,此时冷冻母液的NaCl浓度远高于 Na_2SO_4 ,蒸发浓缩得到高纯度NaCl晶体,通过不同

蒸发条件下的热法分盐实现盐硝分离。

表2 蒸发结晶工序物料

Table 2 Materials of evaporated crystallization process t/d					
项目	进液	硫酸钠干盐	氯化钠干盐	杂盐	生蒸汽 (0.2~0.4 MPa)
数值	120	6.92	1.79	0.74	96.9

2.3 物料平衡计算

对该工程各工序的物料(盐)平衡进行近似计算,为工艺设计、设备选型提供依据,主要项目的物料平衡见表3。

3 主要构筑物及设备参数

该工程主要构筑物及设备参数见表4。

4 运行效果

该工程运行稳定,部分监测数据如表5所示,并与《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)中的表6.1.3限值进行比较。

工程设计原水处理量为800 m³/d、TDS 10 713 mg/L,膜浓缩工序RO2产水680 m³/d、TDS 26.16 mg/L,膜浓缩系统回收率≥85%,脱盐率≥99%,结合表3、表5可见,膜产水水质远优于标准限值,满足设计要求,部分指标达到地表水环境Ⅰ类标准,产水回用可显著改善全厂水质。

蒸发结晶工序原液依次通过三效、一效、二效进行蒸发,当地大气压82.4 kPa,生蒸汽压力约0.5 MPa、温度147℃,部分控制参数如表6所示。

盐硝分离的硫酸钠结晶盐和氯化钠结晶盐质量分数分别为92.31%~98.46%、92.23%~97.38%。硫酸钠结晶盐为Ⅲ类合格品(质量分数≥92%),氯化钠结晶盐为工业盐二级品(质量分数≥92%),结晶盐全部外售,可节省混盐固废处置费。其中硫酸钠盐销往化工企业,配合碳酸氢铵生产纯碱和复合氮肥;氯化钠盐销往盐化工企业,用于生产精制盐等。

5 工程投资及运行费用

该工程建设投资3 596.83万元,其中工程费用3 057.76万元,其他费用319.55万元,预备费219.52万元。运行费用包括电耗、药剂、蒸汽、职工薪酬。电耗为19.3 kW·h/m³,按电价0.4元/(kW·h)计,电费为7.76元/m³;药剂消耗,质量分数32%液碱3.52 kg/m³、

表3 主要物料平衡计算

Table 3 Indicators of main material balance

项目		水量	pH	COD _{Cr}	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	总硬度	TDS	电导率
进水	污酸出水	400	11.5	20	4 931	2 808	8 179	700	1 750	16 689.62	26 703.39
	循环排污水	400	9	60	1 200	600	2 500	320	800	4 718.60	7 549.76
	多介质、超滤回水	235	8	71.22	2 788.06	1 370.86	4 054.55	8.00	20	8 314.61	13 303.37
	加权水质	1 035	9.74	47.09	3 002.51	1 628.36	5 047.75	396.02	990.05	10 161.57	16 258.51
脱钙软化工序	进水	1 035	9.74	47.09	3 002.51	1 628.36	5 047.75	396.02	990.05	10 161.57	16 258.51
	加入 NaOH	10			42 280.39						
	排碳酸钙泥 ^a	15	11	662.37	3 427.57	1 612.78	4 999.44	23 205.33	150	10 166.87	16 266.99
	出水	1 030	11	37.67	3 427.57	1 612.78	4 999.44	60.00	150	10 166.87	16 266.99
膜浓缩工序	进水	1 030	11	37.67	3 427.57	1 612.78	4 999.44	60.00	150.00	10 166.87	16 266.99
	螯合树脂交换床 树脂换钠脱钙 ^b				57.50			51.50			
	出水	1 030	11	37.67	3 485.07	1 612.78	4 999.44	10.00	25.00	10 174.37	16 278.99
	进水	1 030	8	37.67	3 485.07	1 612.78	4 999.44	10.00	25.00	10 174.37	16 278.99
	超滤装置 产水	930	8	26.37	3 485.07	1 612.78	4 999.44	10.00	25.00	10 161.07	16 257.71
	排水	100	8	116.51	3 485.07	1 612.78	4 999.44	10.00	25.00	10 253.21	16 405.13
	超滤产水	930	8	26.37	3 485.07	1 612.78	4 999.44	10.00	25.00	10 161.07	16 257.71
	RO2浓水	225	8	7	875	405	1 255	3	6.28	2 550.68	4 081.08
	RO1反渗透 加权水质	1 025	8	25.37	3 353.33	1 551.81	4 810.46	9.62	24.05	9 776.96	15 643.14
	产水	720	8	1.08	143.20	66.27	205.43	0.41	1.03	417.52	668.03
	浓水	305	8	82.73	10 933.55	5 059.69	15 684.52	31.37	78.43	31 877.83	51 004.54
	RO1产水	720	8	1.08	143.20	66.27	205.43	0.41	1.03	417.52	668.03
	DTRO产水	185	8	4	542	251	778	2	3.89	1 580.72	2 529.15
	RO2反渗透 加权水质	905	8	1.70	224.57	103.92	322.16	0.64	1.61	654.76	1 047.62
	产水	680	8	0.07	8.97	4.15	12.87	0.03	0.06	26.16	41.85
	浓水	225	8	6.62	874.84	404.85	1 254.98	2.51	6.28	2 550.68	4 081.08
	DTRO反渗透 进水	305	8	82.73	10 933.55	5 059.69	15 684.52	31.37	78.43	31 877.83	51 004.54
	产水	185	8	4.10	542.16	250.89	777.74	1.56	3.89	1 580.72	2 529.15
	浓水	120	8	203.15	26 849.47	12 425.06	38 516.42	77.04	192.60	78 282.28	125 251.64
蒸发结晶工序	进水	120	8.00	203.15	26 849.47	12 425.06	38 516.42	77.04	192.60	78 282.28	125 251.64
	蒸馏水	110	8.00	101.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	185.18	296.30

注:除水量(m³/d)、pH、电导率(μS/cm)外,其余项目单位均为mg/L,总硬度以CaCO₃计;a碳酸钙泥沉淀去除钙量折算成水溶液平均浓度;b树脂交换钠脱钙量折算为过流量平均浓度;蒸发结晶工序干盐量(含水率0.5%):硫酸钠6.92 t/d、氯化钠1.79 t/d、杂盐0.74 t/d。

表4 主要构筑物及设备参数

Table 4 Main structures and parameters of equipments

项目	主要构筑物及装置	主要设备参数
脱钙软化	废水脱盐调节池	1座,砼结构,尺寸18 m×5.5 m×4.5 m;提升泵2台,Q=50 m ³ /h,H=20 m,功率11 kW,1用1备;HRT为8 h
	脱钙反应/絮凝槽	3座,碳钢防腐,尺寸D 3 m×4 m;搅拌机3台,功率7.5 kW;HRT为30 min
	浓密池、过滤器	1座,碳钢防腐,尺寸D 9 m×4.65 m;过滤器2台,玻璃钢设备,尺寸D 3.3 m×6 m,带悬浮填料
	中间水池	1座,砼结构,尺寸12 m×4 m×4.5 m;提升泵2台,Q=50 m ³ /h,H=42 m,功率15 kW,1用1备;HRT为4 h
膜浓缩工序	膜车间	1座,框架结构,尺寸36 m×16 m×7 m,内含多介质过滤器、树脂、超滤装置、反渗透系统等
	多介质过滤器、树脂、超滤装置	2台D 2.5 m多介质过滤器,3台D 1 m×2.8 m螯合树脂交换床,均为碳钢衬胶;2套超滤装置UF-45,R>90%,PVDF膜元件20支
	RO1反渗透装置	RO-60,R≥70%,SW30HR-380膜元件54支,4.2 MPa膜壳9支;高压泵1台,Q=55 m ³ /h,H=450 m,功率110 kW;在线增压泵1台,Q=32 m ³ /h,H=35 m,功率7.5 kW;保安过滤器1套
	RO2反渗透装置	RO-50,R≥75%,BW30-400/34膜元件48支,2.0 MPa膜壳8支;高压泵1台,Q=50 m ³ /h,H=160 m,功率30 kW;在线增压泵1台,Q=25 m ³ /h,H=30 m,功率5.5 kW;保安过滤器1套
蒸发结晶工序	DTRO反渗透装置	2套并联,R≥61%,9 MPa膜柱、BW30膜元件2×45支;高压柱塞泵2台,Q=8.16 m ³ /h,9 MPa(max),功率75 kW;在线增压泵2台,Q=25 m ³ /h,H=100 m,9 MPa,功率18.5 kW;保安过滤器1套
	蒸发车间	1座,框架结构,尺寸12 m×20 m×20 m,内含三效蒸发、冷冻结晶、单效蒸发、杂盐干燥、打包系统等
	硫酸钠三效蒸发装置	3套加热器,尺寸D 0.9 m×6 m,换热管D 32 mm,长6 m,F=180 m ² ,壳程316 L,管程TA2;分离器3套,尺寸D 1.1 m×3.5 m,材质2507/TA2;稠厚器1套,D 1.2 m×2 m,材质2507/TA2,1套双极推料离心机P-25
	冷冻结晶装置	冷冻结晶器1套D 1.8 m×3.3 m,V=5.5 m ³ ,材质2205/2507;冷冻稠厚器V=3 m ³ ,材质2205/2507;CLS-100螺杆冷水机1套
	氯化钠单效蒸发装置	加热器1套,F=80 m ² ,壳程316 L,管程TA2;分离器1套,尺寸D 1 m×5.2 m,材质2507/TA2;稠厚器1套,D 1.2 m×1.8 m,材质2507/TA2;1套双极推料离心机P-25
	干燥、打包装置	硫酸钠干燥床:处理量400 kg/h,材质316 L;氯化钠干燥床:处理量100 kg/h,材质2205/2507;喷雾干燥:处理量300 kg/h,打包装置2套

表5 膜浓缩工序产水水质

Table 5 Water quality of membrane concentration process

项目	总硬度	TDS	电导率	COD
膜浓缩产水	2~5	11~23	20.2~34.9	≤10
标准限值	≤250	≤1 000	—	≤60
设计要求	≤50	≤150	≤250	≤10

注:除电导率($\mu\text{S}/\text{cm}$)外,其余项目单位均为 mg/L ,总硬度以 CaCO_3 计。

表6 蒸发结晶工序操作参数

Table 6 Operation parameters of evaporation crystallization process

项目	硫酸钠结晶单元			氯化钠结晶单元		冷冻结晶单元	
	一效蒸发	二效蒸发	三效蒸发	单效蒸发	一级冷冻	二级冷冻	
温度/ $^{\circ}\text{C}$	80	70	60	60	40	0	
压力/ kPa	-35	-51	-62	-62	常压	常压	

CO_2 0.57 kg/m^3 、PAC 0.07 kg/m^3 、HPAM 1.3×10^{-3} kg/m^3 、质量分数 31% 盐酸 1.01 kg/m^3 、膜添加剂综合量 1.1×10^{-3} kg/m^3 ,药剂单价分别为 1 300、1 440、2 200、12 000、740、5 500 元/t,则药剂费为 6.32 元/ m^3 ;蒸汽消耗 121 kg/m^3 ,蒸汽 32 元/t(企业低压蒸汽计价),蒸汽费为 3.88 元/ m^3 ;职工薪酬 130 000 元/(人·a),共 12 人,则人工费 5.91 元/ m^3 。运行费用合计 23.87 元/ m^3 。

经济效益包括结晶盐外售、回用水收入(节约用水)、碳酸钙回用、排污费节约,折算为每吨水收益。副产结晶盐外售收入:硫酸钠 6.92 t/d、氯化钠 1.79 t/d,分别计价 220、50 元/t,收益 2.01 元/ m^3 。回用水收入:回用水 680 m^3/d (膜回收率 85%),水价 3.28 元/t,收益 2.79 元/ m^3 。碳酸钙回用收入:碳酸钙渣量 1.48 t/d,计价 260 元/t,收益 0.48 元/ m^3 。节约排污费:计 0.5 元/ m^3 ,节约排污费 400 元/d。折合吨水收益 5.61 元/ m^3 。

扣减收益后,运行费用为 18.26 元/ m^3 。该工程通过废水脱盐并回用节约了水资源,废水零排放可显著改善区域水环境,具有明显的环境效益。

6 结论

(1)采用脱钙软化+膜浓缩+蒸发结晶综合工艺对铅锌冶炼废水进行脱盐处理,可实现废水零排放,出水水质优于《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)中的表 6.1.3 限值,其中 TDS 11~23 mg/L 、总硬度(以 CaCO_3 计)2~5 mg/L 、电导率 20.2~34.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$,硫酸钠、氯化钠结晶盐质量分数≥

92%,分别达到Ⅲ类合格品和工业盐二级品并外售,碳酸钙沉淀渣用作铅锌冶炼污酸中和剂,无固废。

(2)废水脱盐过程分为脱钙软化、膜浓缩、蒸发结晶 3 个工序。脱钙软化工序采用 CO_2+NaOH 去除硬度;膜浓缩工序采用高压海淡膜+DTRO 浓缩,辅以中低压卷式反渗透对海淡膜、DTRO 产水进行脱盐淡化;蒸发结晶工序采用硫酸钠三效结晶+冷冻结晶+氯化钠单效结晶+杂盐干燥的盐硝分离工艺。膜系统的回收率≥85%、脱盐率≥99%。通过盐平衡计算为工艺设计与设备选型提供依据。

(3)废水脱盐零排放系统运行费用合计 23.87 元/ m^3 ,吨水收益 5.61 元/ m^3 ,扣减收益后,运行费用为 18.26 元/ m^3 ,环境效益显著。废水深度脱盐回用可显著改善全厂水质,提高生产用水重复利用率,同时避免废水外排污染环境。

参考文献

- [1] 卢然,王夏晖,伍思扬,等.我国铅锌冶炼工业废水砷污染状况与处理技术[J].环境工程技术学报,2021,11(4):763-768.
LU Ran, WANG Xiahui, WU Siyang, et al. Thallium pollution status and treatment technology of wastewater from lead-zinc smelting industry in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 763-768.
- [2] 张景来,王剑波,常冠钦,等.冶金工业污水处理技术及工程实例[M].北京:化学工业出版社,2003:8-13.
- [3] 俞彬,陈飞,王小军,等.电厂脱硫废水零排放处理工程实例[J].工业水处理,2018,38(4):94-96.
YU Bin, CHEN Fei, WANG Xiaojun, et al. Case study on the zero discharge treatment of desulfurization wastewater from a power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(4): 94-96.
- [4] 宋淑敏.云南某铅锌冶炼厂含重金属高盐废水高效处理应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2019.
SONG Shumin. The application of efficient treatment for high-salt wastewater containing heavy metals from a lead and zinc smelter in Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [5] 宋洋.铅锌冶炼废水处理技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
SONG Yang. Lead-zinc smelting waste-water treatment technology research [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [6] 陈青柏,刘雨,赵津礼,等.基于新型离子交换膜过程的含盐废水零排放技术[J].化学进展,2019,31(12):1669-1680.
CHEN Baichen, LIU Yu, ZHAO Jinli, et al. Emerging ion exchange membrane process-based zero liquid discharge technology for saline wastewater [J]. Progress in Chemistry, 2019, 31(12): 1669-1680.
- [7] 徐超,丁宁,栗文明. SWRO+MVR 工艺处理净水厂浓盐水零排

- 放工程设计[J]. 工业水处理, 2020, 40(9): 112-115.
- XU Chao, DING Ning, LI Wenming. A combined process of SWRO and MVR design for zero-discharge project for concentrated water of a water purification plant[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(9): 112-115.
- [8] 侯郊, 高延粉. CO₂ 气体软化改善铅锌冶炼废水硬度[J]. 有色金属设计, 2019, 46(3): 65-68.
- HOU Jiao, GAO Yanfen. Improvement of lead-zinc smelting wastewater hardness by softening CO₂ gas[J]. Nonferrous Metals Design, 2019, 46(3): 65-68.
- [9] 常青. 水处理絮凝学[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011: 8-13.
- [10] 夏传, 刘鹏宇, 武福平, 等. 粉末吸附材料协同 HPAM 强化混凝消除微污染水中 OCPs[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 4915-4920.
- XIA Chuan, LIU Pengyu, WU Fuping, et al. Elimination of OCPs in micro-polluted water by coagulation with HPAM and helps of powder materials[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 4915-4920.
- [11] 丁宁, 郭辉, 王陆涛, 等. 高效反渗透工艺在浓盐水浓缩中的应用[J]. 工业水处理, 2021, 41(8): 131-134.
- DING Ning, GUO Hui, WANG Lutao, et al. Application of high-efficiency reverse osmosis process in concentrated brine concentration[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(8): 131-134.
- [12] 邵启运, 蒋志辉, 袁东日, 等. 不锈钢产品生产废水零排放工程实例[J]. 工业水处理, 2021, 41(7): 152-156.
- SHAO Qiyun, JIANG Zhihui, YUAN Dongri, et al. Project example of zero-discharge treatment of stainless-steel production wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(7): 152-156.
- [13] 刘建伟, 康心悦, 岳鹏, 等. 城市生活垃圾综合处理厂渗滤液全量化处理工程设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 70-75.
- LIU Jianwei, KANG Xinyue, YUE Peng, et al. Project design of total quantitative treatment of leachate of urban municipal waste comprehensive treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 70-75.
- [14] 陈富强, 池勇志, 田秉晖, 等. 高盐工业废水零排放技术研究进展[J]. 工业水处理, 2018, 38(8): 1-5.
- CHEN Fuqiang, CHI Yongzhi, TIAN Binghui, et al. Research progress in the zero discharge technology for high-salt industrial wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(8): 1-5.

[作者简介] 夏传(1989—), 硕士, 工程师。E-mail: xch1989@126.com。通讯作者: 李绪忠, 硕士, 正高级工程师。E-mail: 610235358@qq.com。

[收稿日期] 2022-03-07(修改稿)

·国内外水处理技术信息·

一种臭氧微纳气泡废水处理系统及废水处理方法——郭壮, 张在娟, 程永喜, 等. CN 114180670A

本发明公开了一种臭氧微纳气泡废水处理系统及废水处理方法, 废水处理系统包括依次连接的臭氧气泡发生装置, 臭氧微纳气泡发生装置和微纳气泡反应塔, 其中, 所述臭氧气泡发生装置用于将臭氧气体和废水进行一次溶气; 所述臭氧微纳气泡发生装置用于将臭氧气体和废水进行二次溶气。将臭氧和废水经过一次溶气过程和二次溶气过程后, 废水中的微纳气泡的尺寸明显减小, 增强了

微纳气泡在水中的稳定性, 大大延长了微纳气泡的湮灭时间, 利于臭氧传质与溶解, 可以极大提升臭氧利用率, 进一步提高废水处理效果, 使本发明的废水处理系统不必增加接触反应塔数量即可达到废水处理效果, 从而使废水处理系统的体积减小。该系统集成化程度较高, 便于流动化作业, 使用方便。