

李红莲, 林国诚. 两级 RO+两级 AO+MBR 组合工艺处理稀土矿区废水[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 126-131.

LI H L, LI G C. Combined processes of two-stage RO + two-stage AO + MBR for rare earth mining wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 126-131.

两级 RO+两级 AO+MBR 组合工艺处理稀土矿区废水

李红莲^{1,*}, 林国诚²

(1. 闽西职业技术学院, 福建龙岩 364021; 2. 厦门市百仕洁环保科技有限公司, 福建厦门 361000)

摘要 【目的】 稀土作为国家战略资源,其原地浸矿开采技术虽具有效率优势,却产生了氨氮与总氮浓度较高的难处理废水。此类废水若未经严格处理直接排放,将导致受纳水体富营养化,严重威胁水生生态系统安全,并对下游饮用水源构成潜在风险。【方法】 针对稀土原地浸矿开采方式所产生的废水含氨氮、总氮浓度高难处理的问题,采用集成“物化-生化-膜分离”协同工艺处理废水。利用两级反渗透对废水进行过滤浓缩,产生的浓水通过化学沉淀预处理后进行氨氮吹脱,出水采用两级缺氧/好氧(AO)+膜生物反应器(MBR)处理工艺。两级AO系统通过硝化(好氧)与反硝化(缺氧)的交替作用实现强化脱氮效果,MBR则利用膜组件的高效截留作用维持高生物浓度、强化处理效果。【结果】 出水水质氨氮和总氮分别稳定达到15 mg/L和30 mg/L以下,完全满足《稀土工业污染物排放标准》(GB 26451—2011)表2新建企业水污染物直接排放浓度限值的要求。【结论】 该工艺成功地解决了稀土矿区高浓度氨氮、总氮废水的脱氮问题,处理效果稳定,最大程度减少了废水对下游水体生态环境的负面影响,减少了富营养化发生的风险,可为相类似稀土废水的处理提供技术借鉴,对推动稀土行业的绿色可持续发展具有重要意义。

关键词 反渗透(RO) 缺氧/好氧(AO) 膜生物反应器(MBR) 稀土矿区废水 废水处理

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)09-0126-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.016

Combined Processes of Two-Stage RO + Two-Stage AO + MBR for Rare Earth Mining Wastewater Treatment

LI Honglian^{1,*}, LIN Guocheng²

(1. Minxi Vocation & Technical College, Longyan 364021, China;

2. Xiamen Baishijie Environmental Protection Technology Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract [Objective] Rare earth is a national strategic resource. Although its in-situ leaching mining technology has efficiency advantages, it has produced refractory wastewater with high concentrations of ammonia nitrogen and total nitrogen. If such wastewater is discharged directly without strict treatment, it can lead to eutrophication of the receiving water body, seriously threaten the safety of the aquatic ecosystem, and pose a potential risk to the downstream drinking water source. Aiming at the problem of high concentration of ammonia nitrogen and total nitrogen in wastewater produced by rare earth in-situ leaching mining, it is difficult to treat. [Methods] The integrated "physicochemical-biochemical-membrane separation" synergistic process was used to treat wastewater. Firstly, the wastewater was filtered and concentrated by two-stage reverse osmosis. The concentrated water was pretreated by chemical precipitation and then ammonia nitrogen was blown off. The effluent was treated by two-stage anoxic/aerobic (AO) + membrane bioreactor (MBR) process. The two-stage AO system achieved enhanced nitrogen removal by alternating nitrification (aerobic) and denitrification (anoxic). MBR utilized the efficient interception of membrane modules to maintain high biological concentration and enhance the treatment effect. [Results] Operational result demonstrated that the effluent's ammonia nitrogen and total nitrogen concentrations consistently remained below 15 mg/L and 30 mg/L, respectively, fully complying with the direct discharge concentration limits for water pollutants specified in table 2 of the *Emission Standards of Pollutants from Rare Earths Industry* (GB 26451—2011).

[收稿日期] 2024-01-20

[通信作者] 李红莲(1972—),女,教授,主要从事水处理教学及设计等工作,E-mail:925143781@qq.com。

[**Conclusion**] This synergistically integrates process successfully addresses the critical challenge of nitrogen removal from high-strength rare earth mining wastewater. It delivers stable treatment efficacy, significantly mitigates ecological impacts on downstream water bodies by reducing eutrophication risks, and provides a viable technical framework for analogous rare earth wastewater treatment applications. The approach contributes substantially to advancing environmentally sustainable development within the rare earth industry.

Keywords reverse osmosis (RO) anoxic/aerobic (AO) membrane bioreactor (MBR) rare earth mine wastewater wastewater treatment

稀土矿山普遍处在偏僻的山区,矿区普遍分布散,公共设施欠缺,难以集中配套污水处理设施。原地浸矿工艺生产过程中会产生大量的氨氮废水,若不经处理直接排到环境中,会对水体生态环境造成影响,易引起水体富营养化现象^[1]。某稀土矿区采用原地浸取工艺,即将浸取液(硫酸铵)注入矿体中,矿体中的稀土离子与注入液中的阳离子发生交换作用,有用成分被选择性地浸取,形成稀土母液,通过回收井被送至地面,在工厂内进行提取加工^[2]。稀土生产过程中产生了大量氨氮废水,一部分由工厂泄漏至水体,另一部分残留在矿体内,经地表径流带至水体,最终导致下游水体中氨氮、总氮(TN)严重超标,水体 pH 偏酸性,影响了下游的生态环境安全。为保护环境,避免生产废水对周边及下游生态环境的影响,需对废水进行处理。孙远帅^[3]采用预处理-超滤(UF)-反渗透(RO)-消毒处理工艺,UF-RO 处理的浓水采用多级混凝沉淀-厌氧/缺氧/好氧(AAO)-过滤-消毒处理稀土冶炼废水,该系统对综合进水氨氮的质量浓度为 50 mg/L 的情况下,出水氨氮的质量浓度为 0.2~5.0 mg/L,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。目前很少有关于稀土矿山氨氮废水的处理工程实例,但采用两级 RO 工艺对稀土废水过滤浓缩的工程应用尚未见报道。工程项目采用两级 RO+两级 AO+膜生物反应器(MBR)组合处理工艺,处理后主要出水水质指标氨氮和 TN 达到《稀土工业污染物排放标准》(GB 26451—2011)表 2 新建企业水污染物直接排放限值。本文重点介绍了该工艺的处理工艺流程、主要构筑物及设计参数、工程技术关键、处理效果、技术经济分析等情况,为类似的工程设计与运行提供一定的参考。

1 水质与水量分析

污染水来自于山上矿区地表径流水,水体水质

总体呈偏酸性,高氨氮、TN,基本不含 COD 和总磷、总溶解固体(TDS)不高。工程处理设计规模为 6 000 m³/d,处理后出水水质指标达到《稀土工业污染物排放标准》(GB 26451—2011)表 2 新建企业水污染物直接排放浓度限值。设计进水水质及排放限值如表 1 所示。

表 1 设计进水水质及排放限值
Tab. 1 Design Influent Quality and Discharge Limits

水质指标	进水	出水
pH 值	3.0~8.0	6.0~9.0
氨氮/(mg·L ⁻¹)	≤250	≤15
TN/(mg·L ⁻¹)	≤300	≤30

2 废水处理工艺

2.1 处理方案的确定

根据工程进水水质及排放标准要求,工程主要以 pH、氨氮、TN 为主要去除目的。传统的稀土高氨氮废水处理方法主要有吹脱、浓缩结晶、汽提以及磷酸铵镁(MAP)沉淀法等,但这些方法具有能耗高、处理成本高或易产生二次污染等局限性。采用膜处理技术处理稀土废水已有研究^[4]报道,但对此类废水,缺少相应的项目成功案例。本工程通过试验确定和经济测算,采用一种膜处理与传统生化技术结合的处理工艺,确定先用 RO 进行过滤浓缩,透析水直接排放。RO 浓水先经石灰沉淀回收稀土金属,再通过加碱沉淀去除硬度、悬浮胶体物质,沉淀后的上清液通过吹脱塔进行氨氮吹脱,出水采用两级 AO+MBR 膜生化处理工艺。

2.2 处理工艺流程

废水处理工艺流程如图 1 所示。

废水经过引流水渠自流至储水调节池,通过提升泵提升至多介质过滤器,去除水中的悬浮杂质和胶体物质,出水通过保安过滤器后进入一级 RO 系统,透析水进入两级 RO 系统继续浓缩分离,两级 RO 系统透析水进入产水池后达标排放。一级 RO

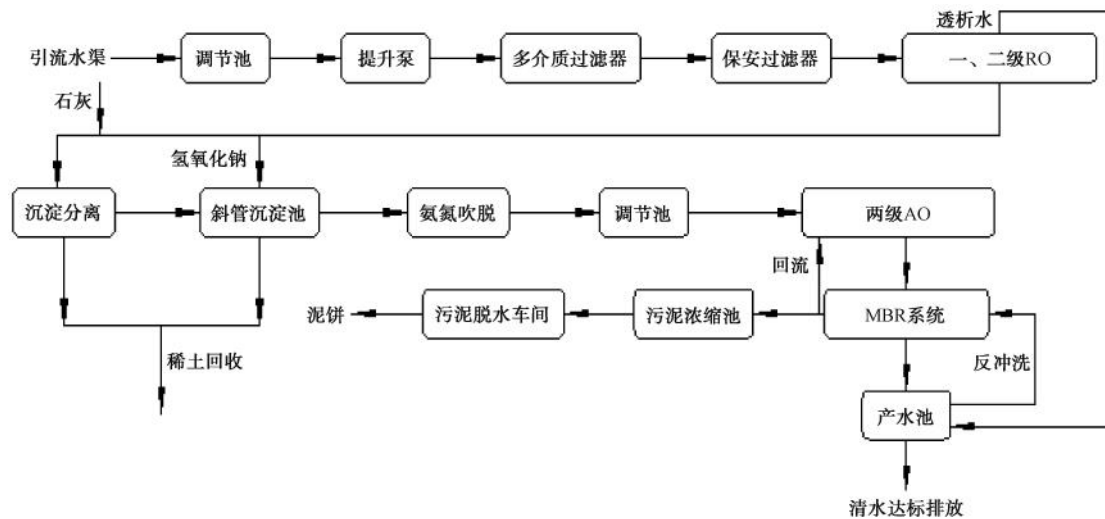


图1 废水工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Wastewater Treatment

系统浓水直接流至稀土回收储水池进行沉淀分离,回收处理,两级 RO 系统浓缩水回至一级 RO 进水回收利用,设计 RO 系统总的回收率为 75%。一级 RO 浓水经过投加石灰沉淀回收稀土金属后,出水提升至斜管沉淀池,继续投加 32% 的氢氧化钠溶液去除硬度和悬浮杂质,沉淀污泥排放至稀土回收处。斜管沉淀池出水通过脱氨吹脱塔吹脱,吹脱塔出水中氨氮的含量得到了降低,经氨吹脱塔处理后的出水流至中间调节池,通过中间调节池提升泵把水提升至生化系统,投加复合碳源、磷酸盐及碱液,通过两级 AO 的生化处理和 MBR 系统的作用,去除水中的氨氮和 TN,通过 MBR 系统处理后的出水进入产水池,经过两级 RO 处理的透析水进入产水池,两者混合后出水达标排放。产生的污泥经浓缩池浓缩后进入污泥脱水车间脱水生成泥饼外运。

3 主要构筑物及设计参数

3.1 多介质过滤器

多介质过滤器共 5 台(4 用 1 备),罐体尺寸为 3.2 m(直径)×1.8 m(直边高度),材质为碳钢防腐,设计滤速为 8.0 m/h,多介质过滤器的滤料为石英砂滤料,自下到上粒径分别为 $\Phi 8 \sim 16$ mm、 $\Phi 4 \sim 8$ mm、 $\Phi 2 \sim 4$ mm,装填厚度为 1 200 mm。反洗方式采用水气联合反洗,反洗强度为 $9 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。配套系统包括进水引水罐、提升泵、反冲洗泵等,通过可编程逻辑控制器(PLC)程序控制气动阀自动与进水提升泵和反冲洗泵联锁运行。

3.2 RO 系统

RO 系统包含一级和两级 RO 处理系统。RO 膜芯使用杜邦 BW30FR-400/34(i) 抗污染 8040 膜,材质为复合材质,由聚酯材料增强无纺布、聚砜材料多孔中间支撑层、聚酰胺材料超薄分离层组成。其中一级 RO 系统设计为一级二段模式,设计进水处理水量为 $6\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,回收率为 75%。一段共 36 支 6 芯装膜管,二段 18 支 6 芯装膜管,设计通量一段为 $16 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,二段为 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,设备尺寸为 $8.0 \text{ m} \times 4.8 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$,框架结构为 304SS 不锈钢。两级 RO 系统设计为一级二段模式,设计进水处理水量为 $4\,500 \text{ m}^3/\text{d}$,回收率为 90%,一段共 25 支 6 芯装膜管,二段 15 支 6 芯装膜管,设计通量一段为 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,二段为 $18 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,设备尺寸为 $7.0 \text{ m} \times 4.8 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$,框架结构为 304SS 不锈钢。

3.3 混凝斜管沉淀池

RO 处理后的浓水经混凝处理后进入混凝斜管沉淀池,设计处理量为 $1\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ 。混凝斜管沉淀池 1 座,尺寸为 $16.8 \text{ m} \times 4.3 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$,钢筋混凝土结构,水力停留时间为 6.0 h,沉淀表面负荷为 $0.86 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

3.4 脱氨吹脱塔

氨氮吹脱塔共 2 套。单体尺寸为塔体 $\Phi 3\,600 \text{ mm} \times 12\,000 \text{ mm}$,每套配置吹脱风机 2 台,流量为 $65\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,功率为 37 kW,吹脱塔循环泵 1 台,流量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程为 12 m,功率为 11 kW。

3.5 两级 AO 池

两级 AO 池设 2 组。一、二级反硝化池, 单体尺寸为 $14.5\text{ m}\times 6.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$, 水力停留时间为 15 h, 配置 2 台转速为 740 r/min, 功率为 2.2 kW 的潜水搅拌机。一、二级硝化池, 单体尺寸为 $17.5\text{ m}\times 7.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$, 有效水深为 5.4 m, 水力停留时间为 21 h。污泥质量浓度为 4 000 mg/L, 好氧池出口处溶解氧质量浓度为 2.0 mg/L。配置若干 $\Phi 215\text{ mm}$ 微孔曝气盘, 生化系统配置罗茨鼓风机 2 台, 流量为 $35\text{ m}^3/\text{min}$, 功率为 55 kW。

3.6 MBR 系统(2 组)

中间水池, 单体尺寸为 $9.5\text{ m}\times 4.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$, 水力停留时间为 6.0 h, 配置 $\Phi 215\text{ mm}$ 微孔曝气盘。MBR 膜池, 单体尺寸为 $8.0\text{ m}\times 4.0\text{ m}\times 6.0\text{ m}$, 水力停留时间为 5.6 h, 配置单组有效膜面积为 $1\,680\text{ m}^2$, 组件 2 组(含膜框架和吊架)。MBR 膜组件为 LMBR-60-2100, 共 $4\,200\text{ m}^2$, MBR 使用的是中空纤维帘式膜, 材质为聚偏二氟乙烯(PVDF), 设计通量为 $15\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。MBR 膜池污泥混合液悬浮固体质量浓度为 6 000 mg/L, 配置 MBR 膜组件罗茨鼓风机 2 台, 流量为 $26\text{ m}^3/\text{min}$, 功率为 30 kW, 风机为 MBR 系统共用。

4 工程技术关键

4.1 两级 RO

采用两级 RO 处理系统处理稀土矿区废水, 既能使浓水中含有的稀土进行回收处理, 又能确保经两级 RO 处理后的透析水中氨氮和 TN 能稳定达到排放标准。RO 处理稀土矿区废水, 运行过程中应控制好以下几点。(1) 膜通量的设计。设计的膜通量不宜过大, 如果过大, 一方面会使膜芯性能衰退快, 另一方面则造成污染物堵塞较快, 使系统运行过程处于不稳定状态^[5]。(2) RO 膜污染的控制。RO 处理稀土矿区废水, 因废水中含有无机盐, 容易造成膜的污染, 使膜通量降低, 膜质发生劣化^[6-7]。为防止浓水中的沉积污染物对膜造成污染, RO 系统对膜内部的污垢采用周期性的瞬时排出, 同时应注意及时、自动对 RO 膜进行清洗以降低对 RO 膜面的污染。RO 膜运行过程中最大的问题是下雨天时, 进水浑浊, 传统的多介质过滤器无法有效降低淤积密度指数(SDI) 值, 导致保安过滤器滤袋压降上升快, 更换频繁, 同时有穿透的微小无机污泥堵塞 RO

膜芯流道, 清洗恢复困难, 导致 RO 膜芯使用寿命短。控制 RO 膜污染的措施是加强预处理的沉淀效果, 在下雨天时, 通过在储水池入口处投加少量铁盐絮凝剂, 经过多次折流沉淀后再进入多介质过滤器过滤, 同时增加多介质过滤器滤层高度, 更有效地截留悬浮物质。为防止膜的污染, 一方面要控制好 RO 膜的进水水质满足浑浊度 $<1\text{ NTU}$ 、SDI 值 <5 的要求, 另一方面需对 RO 膜进行适时维护清洗。RO 膜在标准化通量下降达到 10%~15% 时应化学清洗 RO 系统, 控制工艺指标入膜压力为 0.3~0.5 MPa, 清洗循环时间为 40~60 min, 污染严重时适当延长, 冲洗终点判断依据为进水与产水电导率检测相差 $20\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下, 清洗结束。

4.2 两级 AO+MBR 处理工艺

稀土矿区废水经两级 RO 处理后的浓水经沉淀、氨吹脱后, 出水采用两级 AO+MBR 工艺处理。组合工艺兼备两者的优势, 其中两级 AO 生化组合工艺由一级反硝化、硝化、二级反硝化、硝化组成, 增加了反硝化、硝化反应的级数, 为反硝化菌以及好氧菌提供良好的生存环境, 利用缺氧段进行反硝化脱氮, 好氧段氨氮被硝化, 提高了生化处理阶段氨氮和 TN 的去除率。MBR 膜代替传统二沉池, 反应器中含有高浓度的污泥, 而且含有十分丰富的生物种群, 增强了抗冲击负荷的能力^[8-10]。采用两级 AO+MBR 组合工艺处理稀土矿区的废水, 运行中应控制好以下几点。(1) 由于稀土矿区废水水质存在氨氮、TN 浓度高, 有机物较低的情况, 生化处理阶段应控制好影响微生物生存的环境因素, 运行过程中需投加合适的复合碳源、磷酸盐、碱液等以满足微生物生长所需要的营养物质及碱度, 最大限度地降低污染物的浓度, 提高对氮的生物去除率。复合碳源主要由醇类、糖类、有机酸、矿物质、维生素、酶、活性肽、生物促生剂按一定比例组成有效 COD 质量浓度为 $1.2\times 10^6\text{ mg/L}$ 液体类物质。运行过程中如果碳源和液碱投加量不当, 容易出现生化部分 TN 出水不稳定的现象。针对此问题, 采取的控制措施是通过每天监测浓水进水水质和水量, 按水质水量计算需削减的 TN 量, 按 COD/TN 约为 5 的比例投加复合碳源, 碱液投加量则通过碱液投加计量泵与生化在线 pH 连锁, 确保生化段 pH 值大于 7.5。(2) MBR 工艺污泥回流对缺氧段存在一定的冲击, 该工艺控制的关键是 TN 指标。

5 处理效果分析

项目工艺运行后,对项目的进出水氨氮、TN 等指标进行了日常的连续检测,同时出水安装了在线监测,监测结果表明,出水 pH 值稳定保持在 6.0~

9.0,氨氮可稳定保持在 15 mg/L 以下,TN 稳定保持在 30 mg/L 以下,出水指标均已稳定达到 GB 26451—2011 新建企业水污染物直接排放标准。各处理单元效果如表 2 所示。

表 2 各处理单元的实际运行效果

Tab. 2 Practical Operation Effect of Different Treatment Units

构筑物	氨氮			TN		
	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率	进水/(mg·L ⁻¹)	出水/(mg·L ⁻¹)	去除率
两级 RO	133.0	4.1	97%	168.0	7.9	95%
混凝斜管沉淀池	285	262	8%	292	271	7%
氨氮吹脱池	262	128	51%	271	143	47%
两级 AO+MBR 池	128	5.6	96%	143	13.0	91%
产水池	4.5	4.5	/	9.2	9.2	/

6 技术经济分析

项目工艺运行费用主要由电费、药剂费、更换膜芯、膜组件、人工费及维修费用组成。工艺用电处理设备的总装机容量为 959.0 kW,实际运行工作容量为 769.1 kW,电价按 0.6 元/(kW·h),按运行实际测算,电费处理费用为 1.85 元/m³。所投加药剂包括氢氧化钠、复合碳源、次氯酸钠、膜清洗剂,药剂费用为 2.98 元/m³。更换膜芯和膜组件、人工费、维修费用及管理费用为 1.14 元/m³,系统直接运行成本为 5.97 元/m³。

7 结论

(1)工艺采用 RO 先过滤浓缩,透析水直接排放,浓缩水通过沉淀后再进行氨氮吹脱,出水进行两级 AO+MBR 组合工艺处理,出水水质指标氨氮、TN 均能稳定达到《稀土工业污染物排放标准》(GB 26451—2011)表 2 新建企业水污染物直接排放浓度限值,可为相类似矿区废水处理提供技术参考。

(2)工艺在前端通过 RO 膜处理技术进行浓缩分离,浓水经沉淀可进行稀土回收,产生了一定经济效益、环境效益和社会效益。同时浓水中含有高浓度的氨氮,用空气吹脱法处理提高了氨氮脱除效率,降低了污染物的浓度,提高了后续生化处理对氮的去除率。

(3)工艺整体组合对氨氮和 TN 的去除率高。通过两级 RO,氨氮平均去除率高达 97%,TN 平均去除率达 95%。两级 AO+MBR 组合工艺处理后氨氮平均去除率高达 96%,TN 平均去除率达 91%。运行结果表明,系统组合对氨氮和 TN 具有良好的

去除效果。

参考文献

- [1] 覃伟宁,肖羽堂. 两级氧化法处理稀土矿山氨氮废水工程实例[J]. 工业水处理, 2020, 40(1): 100-104.
QIN W N, XIAO Y T. Two-stage oxidation process for treatment of ammonia nitrogen wastewater from rare earth mines [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(1): 100-104.
- [2] 梁发,陆安丛,潘晓峰. 浅谈广西六汤稀土矿开采工艺特点[J]. 采矿技术, 2018, 18(3): 9-11.
LIANG F, LU A C, PAN X F. Taking about the characteristics of mining technology of Liutang rare earth mine in Guangxi [J]. Mining Technology, 2018, 18(3): 9-11.
- [3] 孙远帅. 稀土冶炼废水处理工程实例[J]. 工业用水与废水, 2022, 53(1): 62-65.
SUN Y S. A project example of rare earth smelting wastewater treatment [J]. Industrial Water and Wastewater, 2022, 53(1): 62-65.
- [4] 罗小娟,雷琼. 基于膜技术处理离子型稀土矿开采废水的研究[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(6): 145-154.
LUO X J, LEI Q. Study on the treatment of ion-type rare earth ore mining wastewater by membrane technology [J]. Nonferrous Metal Science and Engineering, 2022, 13(6): 145-154.
- [5] 桂双林,麦兆环,熬子强,等. 南方稀土冶炼废水的特点及其处理技术研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(7): 80-84.
GUI S L, MAI Z H, AO Z Q, et al. Characteristics and treatment technology of south rare earth refining wastewater [J]. Environmental Science and Managment, 2017, 42(7): 80-84.
- [6] 朱和玲,姚骥. 南方离子型稀土矿矿区氨氮废水治理工艺研究[J]. 现代产业, 2019, 35(6): 13-16.
ZHU H L, YAO J. Study on the application of ammonia nitrogen wastewater treatment process in southern ionic rare earth mine

- area[J]. Modern Industey, 2019, 35(6): 13-16.
- [7] 黄海明, 傅忠, 肖贤明, 等. 反渗透处理稀土氨氮废水试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(8): 38-39.
- HUANG H M, FU Z, XIAO X M, et al. Study on treatment of rare-earth ammonium nitrogen wastewater by reverse osmosis[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(8): 38-39.
- [8] 刘强, 张磊. UASB+两级 AO+MBR 工艺处理高浓度原料药废水[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 139-143.
- LIU Q, ZHANG L. Engineering design of UASB, two-stage AO, and MBR process for treating high concentration API wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 139-143.
- [9] 安斌. 某饮料厂二级反渗透纯净水系统深化设计及优化运行[J]. 甘肃科技, 2023, 39(4): 20-22.
- AN B. Deepening design and optimal operation of secondary reverse osmosis purified water system in a beverage plant [J]. Gansu Science and Technology, 2023, 39(4): 20-22.
- [10] 王亮, 汪炎, 王世卓, 等. UASB-两级 A/O 工艺处理某精细化工废水工程实例[J]. 工业用水与废水, 2021, 52(5): 55-58.
- WANG L, WANG Y, WANG S Z, et al. A project example of fine chemical industrial wastewater treatment by UASB-two stage A/O combined process [J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 52(5): 55-58.

(上接第 125 页)

- The Central People's Government of the People's Republic of China. The 14th five-year plan for national economic and social development of the People's Republic of China and the outline of the vision goals to 2035 [EB/OL]. (2021-03-11) [2024-12-21]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [3] 李明. 城市生活污水厂处理工业废水的运营管理对策[J]. 安防科技, 2021(4): 182-182.
- LI M. Operation and management countermeasures of industrial wastewater treatment in municipal domestic sewage plant [J]. Security Science and Technology, 2021(4): 182-182.
- [4] 高秋凤. 工业企业废水排放对城市污水处理厂运行影响的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2023.
- GAO Q F. A study of industrial wastewater discharge on the operation of urban wastewater treatment plants [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 城乡排水工程项目规范: GB 55027—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Project code for urban and rural sewerage: GB 55027—2022[S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2022.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [7] 刘杰, 刘涛, 苏红玉, 等. 我国工业污水集中处理厂运行及水质特征分析[J]. 给水排水, 2021, 47(6): 92-96, 103.
- LIU J, LIU T, SU H Y, et al. Analysis on operation and water quality characteristics of industrial wastewater treatment plants in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 92-96, 103.
- [8] 张自杰. 排水工程: 下册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- ZHANG Z J. Drainage engineering: Volume II [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [9] 高廷耀, 顾国维. 水污染控制工程: 下册[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- GAO T Y, GU G W. Water pollution control project: Volume II [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [10] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 给水排水设计手册 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. Water supply and drainage design manual. [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2017.