

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.022

磷酸铁系电池正极材料生产废水处理工程实例

陈侃^{1,2}, 张志浩¹, 叶超², 房睿^{3,4}, 王琦^{3,4}, 张琨^{3,4},
马楫², 郑彤¹

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 苏州苏净环保工程有限公司, 江苏 苏州 215000; 3. 哈尔滨工业大学水资源国家工程研究中心有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150001; 4. 广东粤海水务投资有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 某动力电池用磷酸铁系正极材料生产企业排放的炉窑废水与尾气喷淋废水水量为15 m³/d, 该废水含有大量呋喃、有机胺、噻唑等高浓度含硫含氮有机污染物及悬浮物, 可生化性差, 处理成本高。采用混凝沉淀+单效蒸发+刮板滚筒干燥将有机废水中大部分悬浮物、COD、氨氮、总氮固定进入固废中去除, 随后与150 m³/d经混凝沉淀的厂区生产循环冷却水排水混合稀释, 再通过AO+MBR生化处理进一步脱氮并去除有机物。该项目投资1 200万元, 建成后有机废水处理费较原委外处理方式降低77.2%。运行结果显示, 该组合工艺对COD、氨氮、总氮的平均去除率分别达到99.79%、99.87%、99.90%, 最终出水指标稳定在COD≤200 mg/L、氨氮≤40 mg/L、总氮≤60 mg/L, 满足《无机化学工业污染物排放标准》(GB/T 31573—2015)的间接排放标准。

关键词: 动力电池; 炉窑废水; 尾气喷淋废水; 磷酸铁系正极材料; 蒸发干燥; 生化处理

中图分类号: X76 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2024)08-0130-07

Organic Wastewater Treatment Project Case of Iron Phosphate Cathode Material Production for Battery

CHEN Kan^{1,2}, ZHANG Zhi-hao¹, YE Chao², FANG Rui^{3,4}, WANG Qi^{3,4},
ZHANG Kun^{3,4}, MA Ji², ZHENG Tong¹

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Suzhou Sujing Environmental Engineering Co. Ltd., Suzhou 215000, China; 3. Urban Water Resources Development and Utilization <Northern> National Engineering Research Center, Harbin 150001, China; 4. Guangdong Yuehai Water Investment Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: The furnace wastewater and exhaust gas scrubber wastewater generated by an enterprise producing iron phosphate cathode materials for automotive batteries has the volume of 15 m³/d, and contains high concentrations of sulfur and nitrogen organic pollutants such as furans, organic amines, and thiazoles, as well as suspended solids, which have poor biodegradability and high treatment costs. Most of suspended solids, COD, NH₃-N, and TN in the organic wastewater are fixed into the solid waste for removal by coagulation sedimentation, single-effect evaporation, and scraper drum drying. The treated

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0408001)

通信作者: 郑彤 E-mail: zhengtong@hit.edu.cn

wastewater is mixed and diluted with 150 m³/d of circulating cooling water from the plant area after coagulation sedimentation, and is further treated using an AO and MBR technology to achieve denitrification and removal of organic substances. The total investment in this project amounted to 12 million yuan, resulting in a 77.2% reduction in treatment cost compared to previous commissioned treatment. Operational results demonstrate that the average removal efficiency of COD, NH₃-N, and TN of the combined treatment process achieve 99.79%, 99.87% and 99.90%, respectively. The final effluent quality meets the indirect discharge standards specified in the *Emission Standards of Pollutants for Inorganic Chemical Industry* (GB/T 31573-2015), with COD≤200 mg/L, ammonia nitrogen less than 40 mg/L, and total nitrogen less than 60 mg/L.

Key words: automotive battery; furnace wastewater; exhaust gas scrubber wastewater; iron phosphate cathode material; evaporative drying; biochemical treatment

新能源汽车已成为实现长期“碳中和”目标的重要方向之一^[1]。动力电池是新能源汽车的核心组成部分,而动力电池正极材料的生产是动力电池产业链的关键环节。磷酸铁系材料于1997年被发现可作为电池正极材料^[2],其原料来源广泛、价廉且相对安全^[3],因此成为研究热点之一^[4]。随着近年来此材料的性能不断提升^[5],目前在新能源电池中市场份额也不断扩大^[6]。在各磷酸铁系正极材料生产过程中会产生各类污染物^[7],其中,产生的有机废水难降解、浓度高,处理难度大,若不进行妥善处理将带来很大环境风险,是目前该行业必须面对的环保难题。

1 项目背景

云南某动力电池材料生产企业,年产10×10⁴ t磷酸铁系正极材料,将碳酸锂、磷酸铁等作为锂源和磷铁源,将糖、醇类等作为碳源,采用一步法在还原性气氛中烧结制备纳米磷酸铁系正极材料^[8]。在烧结过程中,高温下挥发、反应产生各类有机物。这些有机物通过炉窑清洗或炉窑尾气处理装置进入废水,形成一类高浓度有机废水。该企业长期将这类有机废水作为危废委外处理,处理成本高。为降本增效,亟需设计、建设一套厂内处理装置实现该废水达标排放。

2 设计水质和水量

厂区除炉窑废水以及炉窑尾气喷淋水组成的有机废水外,还包括冷却塔产生的冷却循环水排水。设计有机废水处理量为15 m³/d,水质较好的冷却循环水处理量为150 m³/d。

结合企业例行检测数据,确定设计进水主要污

染物指标(见表1)。有机废水经过处理后,pH、COD、氨氮、总氮等指标需达到《无机化学工业污染物排放标准》(GB/T 31573—2015)的间接排放标准:pH为6~9,COD为200 mg/L,氨氮为40 mg/L,总氮为60 mg/L,SS为100 mg/L。

表 1 废水水质

Tab.1 Wastewater quality

项目	pH	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总氮/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	电导率/ (mS·cm ⁻¹)
有机废水	5~10	20 000~150 000	2 000~15 000	2 000~30 000	20 000~200 000	500~2 000	20~100
冷却循环水排水	6~7	100~150	30~50	10~40	10~60	5~50	1~3

3 工艺流程的确定

3.1 进水污染物特性

由于有机废水的COD、氨氮、总氮极高,因此首先需检测废水中主要有机物类型。采用液相色谱-高分辨二级质谱色谱(LC-qTOFMS)分离分析,得到可能的有机物成分,见表2。

表 2 液相色谱-高分辨二级质谱分析得到的可能成分

Tab.2 Possible components obtained by LC-qTOFMS

项目	出峰时间/min	相对分子质量	分子式	可能结构	峰强
正离子	14.1	261	C ₁₁ H ₂₁ N ₂ O ₂ S ₂	某含氮含硫有机物	4 260 756
	24.5	457	C ₂₆ H ₄₉ O ₆	PEG-4 油酸酯	10 530 275
负离子	10.9	144	C ₉ H ₆ NO	苯并呋喃-4-甲腈	1 492 025
	11.5	138	C ₆ H ₄ NO ₃	5-呋喃-2-羧酸	4 364 630
	13.6	152	C ₆ H ₆ N ₃ S	2,1,3-苯并噻唑-5-胺	1 278 928

根据进、出水水质与主要有机物检测分析,确定主要污染物为各类呋喃、有机胺、噻唑、含硫有机物等,可生化性较差,且通过原水 B/C 值也可验证此判断。据此制定如下工艺路径:首先通过混凝沉淀去除悬浮物,随后通过蒸发工艺将大量有机物固定于蒸发器结晶物,最后对蒸发冷凝水进一步生化降解。

此外,还同步检测到废水中的氯离子含量为 6 750 mg/L,提示在设备选型时需考虑氯离子与盐分对设备的腐蚀。

3.2 小试探索

探索试验分物化混凝沉淀、蒸发浓缩两步进行,分别考察混凝药剂投放量、蒸发浓缩后母液性状和冷凝水的可生化性。

3.2.1 试验方法

① 在 500 mL 烧杯中投加硫酸、氢氧化钠,将原水 pH 调至 7~8,随后通过投加 PAC (100~1 000 mg/L) 与 PAM (6~60 mg/L) 进行 6 组试验,沉淀 30 min 后检测悬浮物,确定药剂投加量。

② 将沉淀上清液转移到蒸发瓶中进行常压蒸馏。在蒸馏试验中,记录 1 000 mL 废水的沸点变化和流动状态,直到蒸发至最终状态。记录不同蒸发量情况下的沸点变化和母液的流动性。收集蒸发冷凝液,检测其 BOD₅ 和 COD,并计算 B/C 值。

3.2.2 试验结果

混凝沉淀试验结果见表 3,蒸发试验结果见表 4。

表 3 混凝沉淀试验结果

Tab.3 Results of coagulation and precipitation experiment mg·L⁻¹

序号	PAC 投加量	PAM 投加量	沉淀上清液悬浮物
1	100	6	140
1	200	12	95
2	350	21	23
3	500	30	10
4	650	39	9
6	1 000	60	9

经过探索试验,有机废水经过混凝沉淀后悬浮物可降至 10 mg/L 以下,确定混凝阶段 PAC 投加量为 500 mg/L、PAM 投加量为 30 mg/L。经过蒸发后冷凝液 COD 为 2 240 mg/L, BOD₅ 为 765 mg/L,蒸发冷凝水 B/C 值由原水的 0.1 提升至 0.34,可生化性大

幅提升。

表 4 试验中蒸发各阶段沸点与母液流动性

Tab.4 Description of boiling point and fluidity of mother liquor at different stages of evaporation in experiment

序号	蒸发剩余量/mL	沸点/℃	直观现象
1	1 000	97	流动性很好
2	900	97	流动性很好
3	800	98	流动性很好
4	700	99	流动性很好
5	600	99	颜色慢慢开始变深,流动性较好
6	500	100	颜色继续变深,流动性较好
7	400	102	较浓稠,但具流动性
8	300	103	较浓稠,流动性较差,瓶内产生胶状物质
9	200	105	浓稠,流动性差,胶状物质较多
10	85		最终状态,几乎无流动性,棕色胶状物质,冷却后为固态

在蒸发试验中,物化沉淀后的废水在浓缩 2.5 倍以内,母液流动性较好,污堵情况可控。继续浓缩,母液流动性减缓,最终形成胶状物质,并在冷却后固化,堵塞风险增加。

因此,确定在蒸发器后连接刮板滚筒干燥机处理蒸发器母液。刮板滚筒干燥机的工作原理是在加热滚筒表面形成薄膜,通过滚筒旋转进行干燥。干燥后的物料通过刮刀刮下,滚筒表面再次与原料接触形成薄膜再次干燥。该设备适用于化工、制药、食品等行业的产品干燥。刮板滚筒干燥机对原料纯度要求低,几乎不会堵塞,适用于处理蒸发器浓缩后的黏稠母液。

3.3 工艺流程设计

结合相关工程设计经验,参照小试探索结果,该有机废水最终选择混凝沉淀+单效蒸发+刮板滚筒干燥+AO+MBR 的工艺路线,循环冷却水排水经过混凝沉淀后即可与有机废水冷凝水合并处理。

有机废水首先进入废水调节池进行均质处理。之后提升至 pH 调节池,调整 pH 至 7~8,加入 PAC (500 mg/L) 和 PAM (30 mg/L) 进行混凝絮凝。沉淀后的上清液进入单效蒸发器进水箱,再进入单效蒸发器进行蒸发浓缩,浓缩倍率为 2,产生的 50% 母液

进入滚筒干燥机进水箱,再定量连续泵入滚筒干燥机。滚筒干燥机浓缩约5倍,剩余10%的黏稠母液经刮刀刮出后自然冷却外运。滚筒干燥机和蒸发器产生的冷凝水合并收集,经过换热器冷却后进入冷凝水箱。冷凝水与经过混凝沉淀的冷却循环排水按1:10的比例混合,进入生化系统。在生化系统的缺氧池中连续投加碳源(葡萄糖或甲醇),控制碳氮比5:1,并控制硝化液回流比为200%~400%。污泥回流比为200%,最后在MBR池进行泥水分离。MBR产水进入排放水池,检测合格后排放。

厂区冷却循环水排水的处理系统为企业已建设施。此废水经过调节池均质均量后,通过泵提升至 pH 调节池,将 pH 调整至 7~8,随后投加 PAC(100 mg/L)、PAM(10 mg/L)进行混凝絮凝,沉淀后的上清液排放或进入有机废水处理系统与有机废水冷凝液混合后进行生化处理。

总体工艺流程见图1。

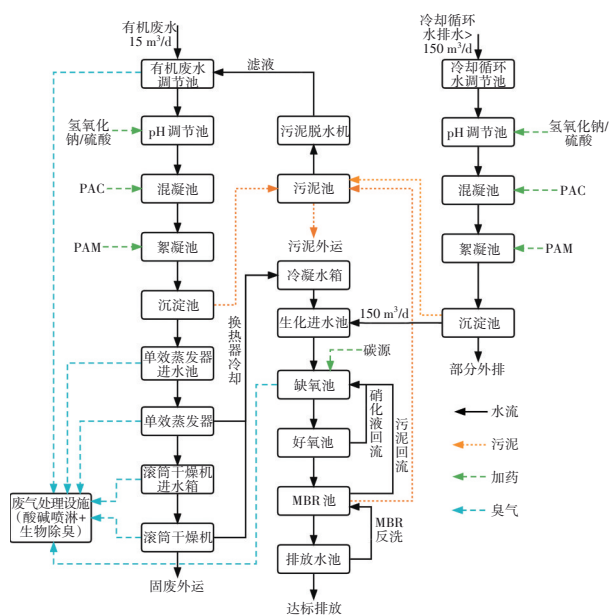


图1 废水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

4 主要构筑物及设备设计参数

① 有机废水调节池。1座,PE水箱,有效容积 20 m³。

主要配套设备:提升泵2台(1用1备, $Q=1\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $P=0.37\text{ kW}$),数显液位计1套。

② 混凝沉淀池。1座,钢筋混凝土结构,内设三布五涂环氧树脂防腐,含单效蒸发器进水池。外形尺寸:2 m×4 m×4 m。各级反应池,单效蒸发器进

水池尺寸:1 m×1 m×4 m;沉淀池 2 m×2 m×4 m,水力表面负荷 $0.19 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水池利旧。

主要配套设备:加药装置3套,搅拌机3台,污泥泵2台(1用1备,气动泵为316L材质),沉淀池设 $\varnothing 200$ mm中心导流筒。

③ 单效蒸发器。蒸发量 350 kg/h, 蒸汽消耗量 400 kg/h, 外形尺寸: 5.5 m×2.5 m×5 m。

主要配套设备:表面冷凝器1套(40 m²),蒸发搅拌机1台(7.5 kW),接液部分316L材质,真空泵1台(抽气量120 m³/h,功率4 kW)。

④ 滚筒干燥机进水箱。1座,PP材质,含橡塑保温,有效容积0.5 m³。

主要配套设备:滚筒干燥机进水泵2台(1用1备, $Q=1\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $P=0.37\text{ kW}$), 数显液位计1套。

⑤ 刮板滚筒干燥机。干燥面积 18.8 m^2 , 滚筒尺寸 $\varnothing 2\,000 \text{ mm} \times 3\,000 \text{ mm}$, 滚筒表面碳钢电镀硬铬, 其他为 2205 不锈钢材质, 最大蒸发量 400 kg/h , 蒸汽压力 0.2 MPa ; 温度控制 $130\text{ }^\circ\text{C}$, 滚筒频率 $12\sim 15 \text{ Hz}$ (转速约 1 r/min)。

主要配套设备:传动电机1套(11 kW 变频),除尘喷淋塔1套(4 000 m³/h)

⑥ 冷凝水箱。1座,PP材质,有效容积10 m³。

主要配套设备:生化进水泵2台(1用1备, $Q=1\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $P=0.37\text{ kW}$),数显液位计1套。

⑦ 生化进水池。1座,钢筋混凝土结构,有效容积120 m³。

主要配套设备:提升泵2台(1用1备, $Q=8.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=100 \text{ kPa}$, $P=0.75 \text{ kW}$),数显液位计1套。

⑧ 缺氧池。1座,钢筋混凝土水池,有效容积630 m³,设计总氮容积负荷约0.08 kgTN/(m³·d),控制溶解氧为0.1~0.2 mg/L,MLSS为4 000~4 500 mg/L,污泥龄14.5 d。

主要配套设备:潜水搅拌机2台,碳源加药系统1套。

⑨ 好氧池。1座,钢筋混凝土结构,有效容积520 m³,设计氨氮容积负荷0.04 kgNH₃-N/(m³·d),控制溶解氧为3~4 mg/L,MLSS为4 000~4 500 mg/L,污泥龄14.5 d。

主要配套设备:曝气风机2台(1用1备,11.5 m³/min,60 kPa,18.5 kW),曝气盘360套,硝化液回流泵2台(1用1备, $Q=45\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $P=3$

kW),便携式溶氧仪1套。

⑩ MBR池。1座,钢筋混凝土结构,有效容积125 m³,MLSS为4 000~4 500 mg/L,污泥龄14.5 d。

主要配套设备:MBR膜80帘(膜面积18 m²/帘),曝气风机2台(1用1备,22.8 m³/min,60 kPa,37 kW),膜清洗系统1套,MBR产水泵2台(1用1备, $Q=12\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $P=2.2\text{ kW}$),MBR反洗泵2台(1用1备, $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $P=2.2\text{ kW}$),反洗加药系统2套,行车1套,数显液位计1套。

⑪ 排放水池。1座,钢筋混凝土结构,有效容积60 m³。

主要配套设备:外排水泵2台(1用1备, $Q=2\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $P=0.55\text{ kW}$),数显液位计1套。

⑫ 污泥池。1座,钢筋混凝土结构,有效容积60 m³(利旧)。

主要配套设备:污泥脱水机进料泵(1用1备,气动泵为316L材质),数显液位计1套,板框压滤机1套(过滤面积80 m²,含自动清洗系统)

⑬ 废气处理装置。处理风量3 000 m³/h,含酸碱喷淋系统、生物除臭系统。

⑭ 冷却循环排水调节池。1座,PE材质,有效容积50 m³。

主要配套设备:提升泵2台(1用1备, $Q=7.5\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$, $P=0.75\text{ kW}$),数显液位计1套。

⑮ 冷却循环排水混凝沉淀池。1座,钢筋混凝土结构,外形尺寸3 m×9 m×4 m。各级反应池尺寸为3 m×2 m×4 m;沉淀池尺寸为3 m×3 m×4 m,水力表面负荷为0.8 m³/(m²·h)。水池利旧。

主要配套设备:加药装置3套,搅拌机3台,污泥泵2台(1用1备, $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $P=0.75\text{ kW}$,304材质),沉淀池设 $\varnothing 500\text{ mm}$ 中心导流筒。

5 运行效果

该项目于2023年2月建设完成,同年5月调试达产。2023年6月,由于厂内暂存了大量生产前期积压的有机废水,因此定量以15 m³/d的有机废水运行。冷却循环水排水排放至污水站的水量为160~200 m³/d,均大于150 m³/d,水质稳定低于排放标准。经过混凝沉淀后与有机废水蒸发冷凝水以10:1比例混合后进行生化处理,剩余部分外排。

刮板滚筒干燥机对有机物浓缩效果良好,这些浓缩物最终通过刮板刮下并由吨袋收集冷却后成为固体。

刮板滚筒干燥机出料见图2。

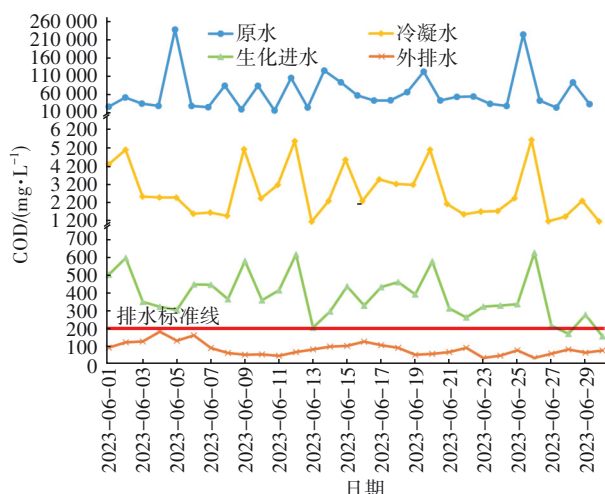


图2 正在出料的刮板滚筒干燥机

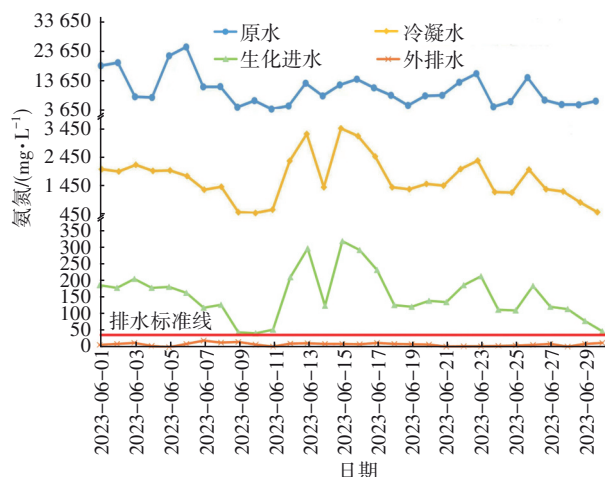
Fig.2 Scraper drum dryer in discharge

通过厂内自建的实验室每日进行水质分析,悬浮物经过混凝沉淀后持续小于20 mg/L,平均为10 mg/L,经过MBR处理后悬浮物稳定小于1 mg/L。

蒸发干燥冷凝水、生化进水、外排水的主要运行数据(COD、氨氮、总氮)见图3。



a. 原水、冷凝水、生化进水、外排水 COD



b. 原水、冷凝水、生化进水、外排水氨氮

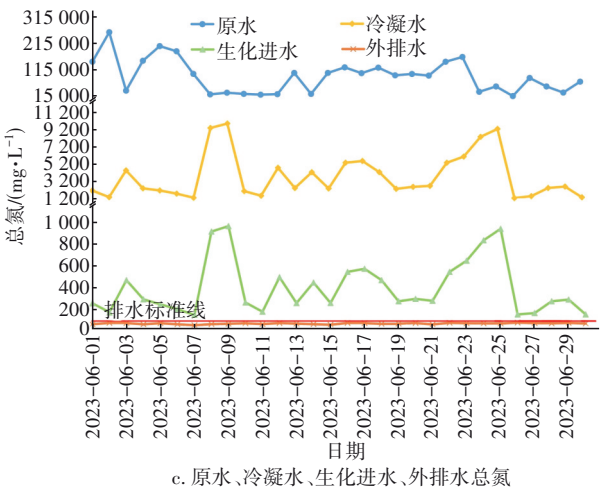


图3 运行阶段原水、冷凝水、生化进水、外排水水质
Fig.3 Water quality of raw water, condensate water, biochemical influent and effluent in operation stage

由图3可见,在一个月的运行期间原水水质变化极大,COD、氨氮、总氮的进水极差分别达到222 040、21 511、239 970 mg/L。蒸发器与干燥机是去除污染物总量最多的单元,大量有机污染物被固定进入固废。通过蒸发干燥后冷凝水中COD、氨氮、总氮极差仅为原水的1/50、1/7、1/27,水质稳定度提高。冷凝水与冷却循环水排水混合后,各种污染物浓度均降低,总氮降至平均368 mg/L,达到一级AO池可脱氮的范围,最后通过AO+MBR处理后稳定达标排放。

主要处理单元的平均处理效果统计见表5。由表5可见,在生化处理前大量污染物已被去除。

表5 蒸发、干燥和生化系统的月平均处理效果
Tab.5 Average treatment effect of evaporation, drying and biochemical system

项目	COD	NH ₃ -N	TN
有机废水进水	63 946	10 303	90 289
蒸发与干燥冷凝水	2 856	1 694	3 739
生化进水	380	82	368
生化MBR出水	82	4	50
排放指标	200	35	60

注: ①数据为研究期间每日检测的平均值;②因悬浮物在物化阶段已处理至20 mg/L以下再进入蒸发工艺,故不做考核。

对每日各处理单元对各污染物的去除率进行统计,得到月均污染物去除率:蒸发、干燥对COD、NH₃-N和TN的平均去除率分别为93.21%、81.57%和91.72%;生化处理对COD、NH₃-N和TN的平均

去除率分别为75.36%、90.99%和80.83%;整体工艺对COD、NH₃-N和TN的平均去除率分别为99.79%、99.87%和99.90%。

6 技术经济分析

该工程占地约550 m²,总投资为1 200万元,其中土建费用为550万元,设备及安装费用为650万元。有机废水处理成本为912.26元/m³。费用组成明细见表6。

表6 运行费用组成明细
Tab.6 Details of operating expenses composition

项目	分类	数量	单价	总价/(元·d ⁻¹)
药剂费	PAM(聚丙烯酰胺)	0.9 kg/d	12元/kg	10.8
	PAC(聚合氯化铝)	15 kg/d	3元/kg	45
	碱(30%氢氧化钠)	0.1 kg/d	1.1元/kg	0.11
	酸(50%硫酸)	0.1 kg/d	0.9元/kg	0.09
	碳源	247.5 kg/d	1元/kg	247.5
电费	各电气设备合计	2 538 kW·h/d	0.8元/(kW·h)	2 030.4
蒸汽费	蒸发、干燥部分合计	18 t/d	250元/t	4 500
人工费	污水站增加运行人员	3人/d	150元/人	450
污泥固废处置费	物化、生化污泥	0.5 t/d	800元/t	400
危废处置费	滚筒干燥后固废	1.5 t/d	4 000元/t	6 000
合计				13 683.9

项目建设前,有机废水委外处理费为60 000元/d;项目建成后,节约危废委外处理费46 316.1元/d,处理费降低77.2%,投资回报周期为259 d。

7 结论

① 对于磷酸铁系电池正极材料生产有机废水,先采用混凝沉淀+单效蒸发+刮板滚筒干燥,再与经混凝沉淀的循环冷却排水混合,经过AO+MBR生化处理后,出水水质稳定达到《无机化学工业污染物排放标准》(GB/T 31573—2015)的间接排放标准。

② 有机废水中大量污染物在生化处理之前被去除,水质得到稳定。

③ 项目建成后有机废水处理费为912.26元/m³,相较原有委外处理方式,处理费降低77.2%,投资回报周期较短,具有较好的经济效益。

参考文献:

- [1] SU C, YUAN X, TAO R, *et al.* Can new energy vehicles help to achieve carbon neutrality targets? [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297(1): 113348.
- [2] PADHI A K, NANJUNDASWAMY K S, GOODENOUGH J B. Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1997, 144: 1188.
- [3] PROSINI P P, CAREWSKA M, SCACCIA S, *et al.* Long-term cyclability of nanostructured LiFePO_4 [J]. *Electrochem Acta*, 2003, 48(28): 4205-4211.
- [4] 杨姗姗, 刘昱. 磷酸铁锂正极材料专利技术分析[J]. *广东化工*, 2023, 50(9): 112-114.
YANG Shanshan, LIU Yu. Patent analysis of LiFePO_4 positive electrode material [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(9): 112-114 (in Chinese).
- [5] 赵露, 宁国庆, 李兴洵. 掺硫碳纳米管作导电添加剂改进磷酸锰铁锂电化学性能[J]. *化工学报*, 2021, 72(12): 6388-6398.
ZHAO Lu, NING Guoqing, LI Xingxun. S-doped carbon nanotubes used as conductive additives to improve the electrochemical performance of LMFP [J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(12): 6388-6398 (in Chinese).
- [6] LIU K, WANG M M, ZHANG Q Z, *et al.* A perspective on the recovery mechanisms of spent lithium iron phosphate cathode materials in different oxidation environments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 445(5): 130502.
- [7] 乐晨, 浦燕新, 韩颖. 新能源行业磷酸铁锂生产废水“零排放”处理技术研究[J]. *安徽化工*, 2022, 48(5): 91-93.
LE Chen, PU Yanxin, HAN Ying. Study on zero discharge treatment technology of lithium iron phosphate production wastewater in new energy industry [J]. *Anhui Chemical Industry*, 2022, 48(5): 91-93 (in Chinese).
- [8] 孔令涌, 李洁凤, 任望保, 等. 一种磷酸铁锂/碳复合材料及其制备方法、包含其的锂离子电池: CN112397713B [P]. 2022-08-05.
KONG Lingyong, LI Jiefeng, REN Wangbao, *et al.* Lithium Iron Phosphate/Carbon Composite Material, Preparation Method, thereof Lithium Ion Battery: CN112397713B [P]. 2022-08-05 (in Chinese).

作者简介: 陈侃(1989-), 男, 江苏苏州人, 博士, 环境工程高级工程师, 机械工程高级工程师, 注册环保工程师, 主要从事工业超纯水、废水、中水回用、零排放等工艺设计与施工建设, 以及人工智能技术在环境工程设计中的应用的研发工作。

E-mail: chenkan_hit@yeah.net

收稿日期: 2023-07-03

修回日期: 2023-07-15

(编辑: 衣春敏)

依法划定河湖管理范围

严格水域岸线水生态空间管控