

磷化废水循环利用系统在汽车涂装线的应用实践

赵川宁

(一汽解放汽车有限公司四川分公司,四川 德阳 618000)

摘要: 为了处理汽车涂装线磷化工艺产生的废水,使其达到环保法规要求的含磷废水“零排放”,本文介绍了某新建汽车厂磷化废水循环利用系统的工艺原理,即采用“磷化废水预处理系统+膜处理系统+MVR系统”相结合的工艺,含磷浓液通过MVR蒸发得到的含磷结晶作为危废处理,产生的清液满足GB 8978—1996《污水综合排放标准》,且电导率 $<5\ \mu\text{S}/\text{cm}$,回用至涂装线前处理纯水槽。同时通过实例从设备参数、运行情况、运行成本等方面进行阐述,对企业节水减排、降低生产成本具有一定的指导意义。

关键词: 磷化废水;循环利用;涂装线;RO系统;MVR系统

中图分类号:TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2025)11-0027-04

Application Practice of Phosphating Wastewater Recycling System in Automotive Painting Line

ZHAO Chuan-ning

(Faw Jiefang Automotive Co., Ltd., Sichuan Branch, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: In order to treat the wastewater produced by the phosphating process of automotive painting line, and make it meet the "zero discharge" of phosphorus-containing wastewater required by environmental law and regulations. In this paper, the process principle of "phosphating wastewater recycling system in a newly-built automotive plant is introduced, that is, the process of phosphating wastewater pretreatment system + membrane treatment system + MVR system" is adopted. The phosphorus-containing crystal obtained by MVR evaporation is used as hazardous waste treatment. The clear liquid produced meets the requirements of GB 8978—1996 *Integrated Wastewater Discharge Standard*, and the electrical conductivity is less than $5\ \mu\text{S}/\text{cm}$, can be reused to the pure water tank for pretreatment of the painting line. As the same time, through an example, it is expounded from the aspects of equipment parameters, operation, operation cost and so on, which has a certain guiding significance for enterprises to save water and reduce emissions and production costs.

Key words: phosphating wastewater; recycling system; painting line; RO system; MVR system

0 引言

磷化工艺是汽车涂装前处理工艺中的重要环节,其目的是在工件表面形成致密磷化膜,提高涂层附着力和防腐能力。但磷化工艺中产生的废水量大,污染物以磷酸盐为主,过度排放使水体富营养化,导致水生物

死亡、水体生态失衡、水质恶化,不当处理会严重污染环境^[1]。磷化废水循环利用系统的应用,既能满足《四川省沱江流域水环境保护条例》中新建涂装线含磷废水“零排放”要求,又可节约水资源,兼具环境和经济效益。某新建汽车厂的磷化废水主要由驾驶室涂装线、车架涂装线磷化工艺及其后续水洗工艺产生,主要污染物为磷酸盐等。经磷化废水循环利用系统处理后,废水回用于驾驶室涂装线、车架涂装线纯水槽补充水,含磷结晶物作为危废处理,无废水外排。

收稿日期:2024-12-12

作者简介:赵川宁(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事商用车涂装工艺管理工作。E-mail:zhaochuaning@fawejiefang.com.cn。

1 设计规模及水质

本项目进水源于两条涂装线的磷化废水及其后续水洗工艺废水，出水回用于两条涂装线电泳前纯水槽补充水，水质需满足 GB 8978—1996《污水综合排放标准》，且电导率 $<5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ，设计处理量为 $8\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

2 工艺流程

采用磷化废水预处理系统+膜处理系统+MVR 系

统工艺。含磷废水先经混凝沉淀、软化工艺、多介质过滤除去 COD、SS、锌、锰、镍及部分有机物，RO 反渗透产生的浓水通过膜浓缩装置进入 MVR 系统，蒸馏得到含磷结晶(作为危废处理)，产生的清液电导率 $<5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ，回用于驾驶室涂装线、车架涂装线电泳前纯水槽。磷化废水循环利用系统工艺流程如图 1 所示。

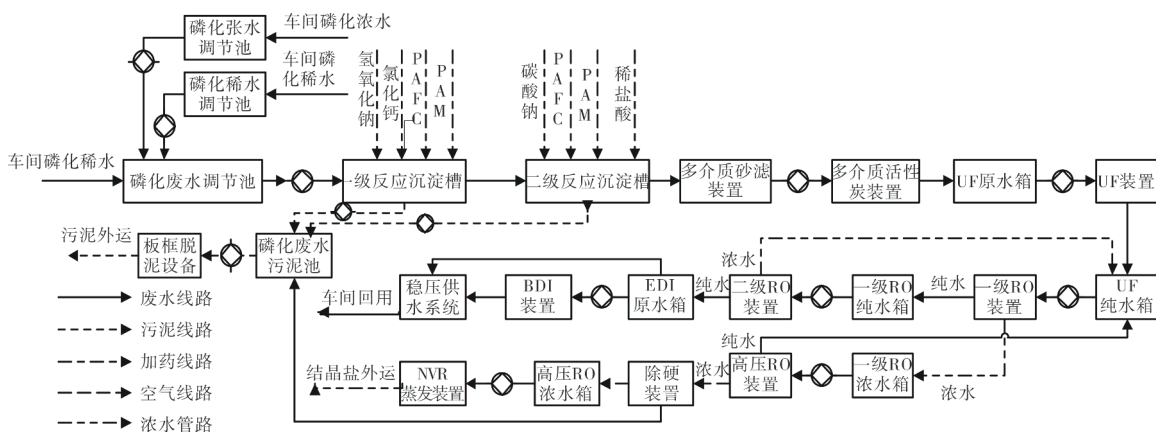


图 1 磷化废水循环利用系统工艺流程

3 主要处理单元及设计参数

3.1 混凝沉淀系统

设置 1 个一级反应沉淀槽($2\ 000\ \text{mm}\times 1\ 000\ \text{mm}\times 2\ 050\ \text{mm}+2\ 000\ \text{mm}\times 3\ 000\ \text{mm}\times 4\ 600\ \text{mm}$ ，碳钢防腐)，1 个二级反应沉淀槽($2\ 000\ \text{mm}\times 1\ 000\ \text{mm}\times 2\ 050\ \text{mm}+2\ 000\ \text{mm}\times 3\ 000\ \text{mm}\times 4\ 250\ \text{mm}$ ，碳钢防腐)，4 台 $1.1\ \text{kW}$ 混合搅拌器，2 台 $0.55\ \text{kW}$ 混合搅拌器，2 台 $0.37\ \text{kW}$ 混合搅拌器，1 台刮泥机，1 台 1 寸气动排泥泵。采用两级混凝沉淀去除重金属离子，调整磷化废水硬度和 pH。

一级反应沉淀槽设有氢氧化钠、氯化钙、PAFC、PAM 加药口，可通过加药系统按工艺要求补充药剂。氢氧化钠浓度为 2.5%。

二级反应沉淀槽设有碳酸钠、PAFC、PAM、稀盐酸加药口，可通过加药系统按工艺要求补充药剂。

3.2 多介质过滤系统

多介质过滤系统主要指采用两种或多种过滤介质的过滤系统。石英砂、砾石、无烟煤、锰砂、颗粒活性炭作为目前常用的过滤介质。本项目采用砂滤+炭滤相结合的方式。

3.2.1 砂滤系统

砂滤系统主要作用是使浊度较高的水在一定压力下，通过一定厚度的过滤介质得到无悬浮杂质的澄清水。本系统采用 $D2\times 4$ 的砾石、 $D1\times 2/D0.6\times 1.2$ 的石英砂、 $D1.8\times 2$ 的无烟煤作为过滤介质。

3.2.2 炭滤系统

炭滤系统让砂滤后的水流经颗粒活性炭，进一步除去残留的有机物、氯及悬浮杂质，减少后续工序的处理压力。本系统采用 $D2\times 4$ 的砾石、 $D1\times 2$ 石英砂、 $D2\times 4$ 的活性炭作为过滤介质。

多介质过滤系统使用多次后，过滤介质孔隙内和颗粒间截留物增多，压差升高直至失效。故在其后增加反水洗设备，通过逆向水流反洗过滤介质，带走截留物，恢复吸附功能。

3.2.3 设备明细

多介质系统设置 2 台 $1.1\ \text{kW}$ 多介质过滤器给水泵，1 套 $2\ 000\ \text{mm}\times 1\ 000\ \text{mm}\times 3\ 500\ \text{mm}$ SUS304 过滤水箱，2 套 $\varphi 800\ \text{mm}\times 3\ 000\ \text{mm}$ 碳钢衬胶砂滤器，2 套 $\varphi 800\ \text{mm}\times 3\ 000\ \text{mm}$ 碳钢衬胶活性炭过滤器，4 台 $3\ \text{kW}$ 反洗泵，2 台 $0.55\ \text{kW}$ 提升泵。

3.3 UF 系统

UF 系统由 1 套处理能力 $9\ \text{m}^3/\text{h}$ 、过滤精度 $5\ \mu\text{m}$ 、材质 SUS304 自清洗过滤器，1 套膜面积 $55.7\ \text{m}^2$ 、过滤精度 $0.02\ \mu\text{m}$ 、材质 SUS316 过滤 UF 膜组件，2 台 $1.5\ \text{kW}$ 反洗泵，2 台 $1.5\ \text{kW}$ 给水泵，1 套反洗加药系统，1 套化学清洗装置，1 个 $2\ 000\ \text{mm}\times 1\ 000\ \text{mm}\times 3\ 500\ \text{mm}$ 、材质 SUS304 产水箱等组成。其作用是截留微小颗粒，去除细菌、悬浮物、部分有机污染物等，改善水质。本系统采用外压式中空纤维超滤膜，其具有良好的抗氧化性和韧性，可接受频繁清洗和多种清

洗方式。

使用中,当膜压差达到 0.15~0.20 MPa、或进水压力 ≥ 0.3 MPa、或产水量下降 20%及反洗无效时,需化学清洗。

3.4 RO 系统

RO 系统由保安过滤器、反渗透机组、高压泵、冲洗及化学清洗等系统构成,同时配备能有效和安全运行所必需的附件、管路、阀门和控制系统等设施。其原理是原水在高压下经反渗透膜,水中的溶剂从高浓度向低浓度扩散,实现分离、提纯、浓缩,因与自然界中的渗透方向相反,又称反渗透。反渗透可以去除水中细菌、病毒、胶体、有机物和 98%以上溶解性盐类^[2]。

本项目采用两级 RO,一级 RO 产生的清液经二级 RO 及 EDI 系统回用,浓液经高压反渗透系统及 MVR 系统处理。

为保证稳定运行,减少结垢污堵,保证出水水质,当膜压差达到 0.15~0.2 MPa,或进水压力 ≥ 0.3 MPa,或产水量下降 20%及反洗无效时,需化学清洗。

RO 系统配置 2 台 4 kW 一级 RO 进水泵,1 台 11 kW 一级 RO 高压泵,1 台 1.1 kW 增压泵,1 套单支膜面积 37.2 m²、数量 18 支、膜通量 16.6 L/(m²·h)一级 RO 膜组件,2 台 3 kW 一级 RO 冲洗水泵,2 台 2.2 kW 二级 RO 进水泵,1 台 5.5 kW 二级 RO 高压泵,1 台 1.1 kW 增压泵,1 套单支膜面积 37.2m²、数量 10 支、膜通量 21.35 L/(m²·h)二级 RO 膜组件等设备。

3.5 EDI 系统

EDI(Electrodeionization)即电去离子,是在电渗析器离子交换膜间填充阴、阳离子交换剂,通过外加直流电场连续深度脱盐的新型分离技术,融合离子交换与电渗析技术^[3]。本项目采用 RO 系统一次除盐,再经 EDI 系统二次除盐,使纯水制造彻底连续化,避免酸碱化学再生。

3.5.1 系统组成

EDI 系统主要由淡水室、浓水室、极水室、绝缘板、压紧板以及电源等组成。淡水室是在阴、阳离子交换膜间填充离子交换树脂形成的淡水单元;浓水室是在相邻淡水单元阴阳离子交换膜间添加树脂形成的浓水单元;极水室是在电极板与相邻离子交换膜中间添加树脂,一个组件有正、负两个极水室。

3.5.2 系统优势

入水和浓水/极水采用逆流方式避免结垢;各水室全填充树脂提高离子迁移效率,运行无需加盐,降低能耗;采用优于可控硅的高频整流电源。

实际运行中,只有当二级产水的电导率在 5 μ S/cm 以上时,需开启 EDI 系统将电导率降至 5 μ S/cm 以下。

3.6 膜浓缩系统

膜浓缩装置又称高压反渗透装置。膜组件由膜元件、压力容器和两个终端法兰组成。膜元件由膜片、产水格网(即产水流道)和进水格网(即进水流道)组成^[4]。

高压反渗透组件适用于高浓度、高盐分废水的浓缩、回收和达标排放,具有适应水源广、膜堆积密度高、占地小、脱盐率高、性能稳定等特点。

为保证稳定运行,减少结垢污堵,保证出水水质,当膜压差达到 0.15~0.20 MPa,或进水压力 ≥ 0.3 MPa,或产水量下降 20%及反洗无效时,需化学清洗。

膜浓缩系统配置 2 台 0.75 kW 高压反渗透进水泵,1 台 5.5 kW 高压反渗透高压泵,1 台 1.1 kW 高压反渗透冲洗泵,1 套流量 4 m³/h、过滤精度 5 μ m、材质 SUS316 保安过滤器,1 套单支膜面积 7.9 m²、数量 18 支、膜通量 15.69 L/(m²·h)高压反渗透膜组件,2 台 0.75 kW,1 台 0.37 kW 搅拌器,1 套 1 000 mm \times 1 500 mm \times 1 100 mm、材质碳钢防腐除硬反应槽等设备。

3.7 MVR 蒸发系统

MVR 即 Mechanical Vapor Recompression,指机械蒸气再压缩技术,是整个磷化废水循环利用系统的重要部分,处理能力 1 m³/h,包括加热器、预热器、蒸发结晶器、冷凝器等以及附属槽罐、水泵、阀门、仪表、安装管路等设备。具体工艺流程如图 2 所示。

3.7.1 工作原理

机械蒸气再压缩技术是重新利用蒸发器自身产生的二次蒸气的能量,从而减少对外界能源的需求的一项节能技术,从蒸发器出来的二次蒸气,通过机械驱动的压缩机将蒸气压缩成为较高压力和温度的蒸气,然后送到蒸发器的加热室当作加热蒸气使用,使料液维持沸腾状态,而加热蒸气本身则冷凝成水^[5]。

3.7.2 工艺特征

热利用率高,传热效率高,加热时间短;真空蒸发,既满足环保要求又降低蒸发温度。

3.7.3 主要设备作用

蒸发进液泵:将调配箱中废水打入蒸发器。

循环泵:蒸发时提高传热效率,加快液体流动。

真空泵:抽蒸发器内空气,正常蒸发时保持增压泵不过载并抽出凝水。

增压泵:将蒸发的蒸气加压返回加热废水,节约能源。

蒸发室:加热后蒸气蒸发的空间。

加热器:将废水蒸出的蒸气再加热废水,达到节能目的。

预热器:将系统产生的热水降温后排出设备。

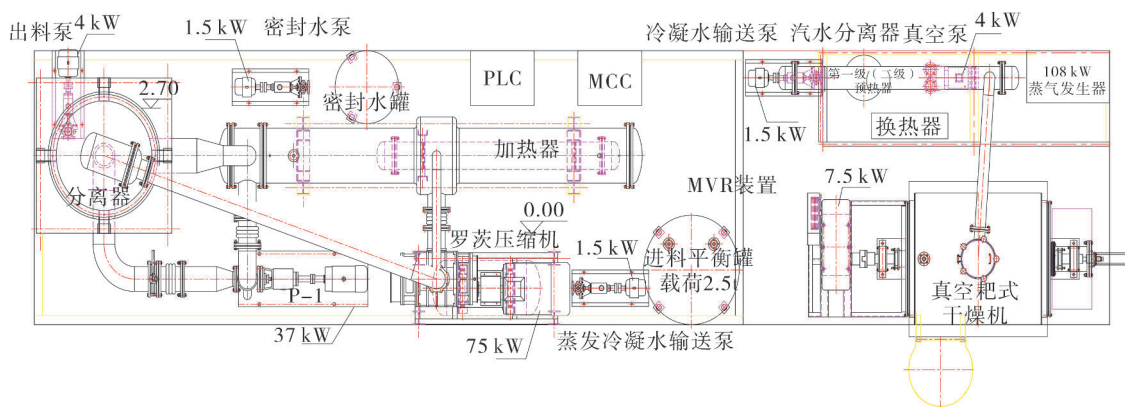


图2 MVR系统工艺流程

4 工艺运行效果分析

系统调试完毕后稳定运行。进水 COD 浓度最高达 160 mg/L 时,出水 COD 浓度为 0, COD 去除率达 100%;进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 10~15 mg/L 时,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 0.15~0.25 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率在 98.5% 以上;进水总磷浓度在 9~13 mg/L 时,出水总磷浓度 0.001 8~0.002 6 mg/L,总磷去除率在 99.9% 以上。

回用水除满足上述标准外,电导率稳定在 2~3 $\mu\text{S}/\text{cm}$,满足驾驶室涂装线、车架电泳线纯水工艺要求,对电泳槽无影响,漆膜性能也满足要求。

通过水质跟踪,在药剂使用方面,取消一级反应沉淀槽 PAFC 药剂使用,取消二级反应沉淀槽碳酸钠、PAFC、PAM-的使用,仅添加盐酸控制水质 pH 在 6.5~7.0 范围内,降低污水处理药剂消耗量。

5 结语

本项目投资约 450 万元,运行费用主要源于 MVR 系统消耗,运行成本 2.55 元/t,药剂处理成本 0.33 元/t。

磷化废水循环利用系统的回用水用于驾驶室涂装线、车架涂装线纯水槽补水是可行的。

自 2024 年设备运行以来,共处理磷化废水 6 600 t,按危废处理需约 830 万元,实际算上系统投资成本、运行费用及药剂费用共约 452 万元,设备运行在满足环保法规前提下,每年约可节约成本 756 万元。

含磷废水处理方案有源头措施和末端措施两种,源头解决方案采用无磷前处理材料使涂装工艺不含磷,末端解决方案即本文所述。具体采用哪种方案取决于材料使用后是否能持续满足电泳漆膜各项性能指标。

参考文献:

- [1] 申柠,魏永宁,杨顺生.汽车磷化废水的处理工艺研究[J].环境科学与管理,2007,32(9):115-117.
- [2] 李少龙,殷会刚,文荣,等.锂离子电池材料低氨氮废水利用反渗透技术[J].科技创新导报,2013(12):56-58.
- [3] 管若伶,胡湘.电去离子技术及其应用进展[J].无机盐工业,2022,54(7):18-26.
- [4] 李大勇.电厂高浓盐水脱盐处理的工艺研究[D].青岛:中国石油大学,2018.
- [5] 戚绪亮,庞欣,安风霞,等.煤化工废水“零排放”技术进展[J].能源科技,2021,19(3):89-92. ◆

(上接第 22 页)

- [5] 张湘衡.汽车车身涂装工艺系列讲座(九)——车身涂层抛光打蜡[J].汽车维修与保养,2009(11):65-68.
- [6] 李文鹏,吕建伟,武英杰,等.两步法与三步法抛光工艺的应用对比探讨[J].中国涂料,2013(10):60-63.
- [7] 张景阳,李宝乐.用科技助我国稀土抛光材料迈向高端[N].科技日报,2021-09-08(006).
- [8] 赵金榜.明天的汽车涂料[J].中国涂料,2003(4):35-39.
- [9] 余剑峰.新型化学机械抛光垫和抛光液的研究[D].广州:华南理工大学,2010.

- [10] 齐庆华.汽车车体表面用抛光剂[J].合成润滑材料,1995(1):15-19.
- [11] 吴湘军.一种震动抛光机:CN201510077094[P].2015-02-12.
- [12] 刘博,郭兴宇,曲丽梅,等.汽车车身表面派瑞林防腐蚀涂层防护性研究[J].汽车知识,2025(2):65-67.
- [13] 胡志强,杨帆,高磊.基于机器视觉的汽车漆面抛光质量在线检测技术[J].机械工程学报,2019(14):186-194. ◆