

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2013.11.009

反渗透技术在电镀给水中的应用

石泰山

(厦门市威士邦膜科技有限公司, 福建 厦门 361101)

摘要: 电镀用水根据水源不同可分为给水、在线水循环、末端水回用、中水回用四类。电镀给水一般采用反渗透技术,对进水水质要求较高,需要砂滤、炭滤、微滤、超滤及正渗透等一种或数种过滤工艺组合作为预处理。当电镀多种给水系统同时存在时,需采用适当的给水组合,使操作、管理和成本最佳。

关键词: 电镀废水; 在线循环; 末端; 中水; 反渗透; 预处理

中图分类号: X703

文献标识码: B

Application of Reverse Osmosis Technology in Electroplating Water Supply

SHI Tai-shan

(Xiamen Visbe Membrane Technology Co., Ltd, Xiamen 361101, China)

Abstract: Electroplating water supply, according to the water sources, could be divided into 4 sorts namely tap, on-line recycling, end-of-pipe recycling and reclaimed water. Reverse osmosis (RO) technology has been used widely in water desalination for purification and reclamation but the RO membranes should be protected from scaling and fouling by pre-filtration, most commonly by using respective or combinative processes such as sand or carbon and/or micro, ultra-filtration or forward osmosis. In case of multiform water supply systems concurrence, combining compatible streams for different processes are needed to reach management, operation, cost-efficiency.

Keywords: electroplating wastewater; on-line recycle; end-of-pipe; reclaimed water; reverse osmosis (RO); pre-treatment

引 言

电镀废水处理经历离子交换树脂处理含铬废水和钛质薄膜蒸发浓缩器闭路循环治理技术推广之后,开始转向化学处理达标排放^[1]。在资源和环境约束下,反渗透技术因其优异的脱盐性能,逐步由海水和苦咸水淡化的应用转向电镀镍回收和电镀中水再生和回用^[2-3]。李峰等^[2]对国内已有反渗透装置的电镀工厂的考察发现,由于反渗透技术应

用在电镀废水再生和回用,因投资和运行费用高,污染膜,产水率低,80%以上设备并不经常使用。

反渗透技术在电镀行业运行不正常主要是废水中总溶解固体的影响。闭路循环可以实现溶质和溶剂平衡,却很难实现杂质平衡,需要严格的操作规程和有效的杂质控制手段^[4]。依据文献^[5-6]推测,电镀中水回用反渗透设施运行不正常可能是处理流程长,水中溶解性固体高,水质不稳定,再生水成本高,产水 pH 和 COD 可能产生交叉污染。

收稿日期: 2013-01-09

修回日期: 2013-03-07

水脱盐技术老方法有蒸发、冷冻和萃取;新方法有离子交换、电渗析和反渗透。反渗透在苦咸水和海水淡化、纯水和超纯水制备有成本优势,操作维护简单,产水水质稳定。电厂锅炉给水、工业纯水制备采用新方法的技术组合能够获得满意的技术、经济效益^[7-8]。

本文按照电镀用水的水源差异,把电镀用水分为四类:电镀给水(自来水、地表水、地下水)、在线水循环、末端水回用和中水回用,相对应的水称为给水、循环水、回用水和再生水。

1 反渗透技术

反渗透技术是在反渗透系统中在浓液一边加上比自然渗透压更高的压力,扭转自然渗透方向,把浓溶液中的溶剂(水)压到半透膜的另外一边。渗透压随溶质种类、溶液浓度和温度的变化而变化^[7-9]。

海水反渗透淡化技术早期能耗约 8.2 kWh/m^3 (无能量回收)^[7],最新能耗约 $2 \sim 4 \text{ kWh/m}^3$ ^[10],理论能耗 1.06 kWh/m^3 ^[11],一般能耗为 $4 \sim 8 \text{ kWh/m}^3$,制水成本为 0.99 美元/m^3 。苦咸水反渗透淡化($500 \sim 30\,000 \text{ mg/L}$ 溶解固体)能耗 $2 \sim 3 \text{ kWh/m}^3$,制水成本 $0.2 \sim 0.7 \text{ 美元/m}^3$ ^[11]。

我国反渗透海水淡化尚未形成规模,工程投资约 $5\,000 \sim 6\,000 \text{ 元/(t} \cdot \text{d)}$,小型海水淡化工程的工程投资更高,能耗 $4.0 \sim 5.5 \text{ kWh/m}^3$,不同规模的海水淡化制水成本约 $5.0 \sim 6.0 \text{ 元/t}$ ^[12]。

电镀生产中使用各种酸碱盐,电镀废水中含盐量较高,类似于咸水或苦咸水,再用循环和回用需要脱盐再生处理。电镀废水又有别于咸水或苦咸水,有机物含量高,某些有机物可以透过炭滤和反渗透,进入再生水。苦咸水的反渗透操作 p 为 $1.5 \sim 4.0 \text{ MPa}$ ^[13-14],电镀给水和在线水回用含盐量较低,操作 p 约 $0.6 \sim 1.6 \text{ MPa}$ 。

2 电镀给水中的反渗透

2.1 电镀给水

传统给水采用混凝、沉淀、砂滤和加氯消毒等常规处理技术,也采用活性炭吸附有机物和除氯。活性炭主要吸附相对分子质量在 $500 \sim 3\,000$ 的有机物,水中有机物不在相对分子质量范围用活性炭处理效果不理想^[15-16]。电镀企业给水一般使用过滤技术如砂滤、炭滤、微滤,纯水使用反渗透技术,超

纯水使用反渗透和离子交换组合。电镀给水的原水一般使用自来水,总溶解固体质量浓度小于 $1\,000 \text{ mg/L}$,制水成本为 $1.5 \sim 1.8 \text{ 元/t}$,其中反渗透高压泵耗电占比约 50% 。电镀给水采用反渗透技术,纯水可用于槽液配制、蒸发补充、镀件清洗,利于锌、锡、镍、铜、铬及贵金属等回收和再用。

2.2 在线水循环

在线水循环指在电镀生产线槽边或线边安装相关设施,处理电镀清洗水并直接循环回用于原用水点^[2]。处理技术有化学法、反渗透或离子交换法等。在线水循环最早为兰茜法^[17],线边化学处理清洗水并直接回用于清洗。膜分离技术用于镍回收,此过程中同步再生循环水用于清洗^[17],就水而言属在线水循环。纯粹以水循环为目的的电镀在线水循环工艺少见报道,多为废水处理和金属回收的辅助^[2-3,14]。

陈锋等^[14]使用两级三段反渗透工艺回收镍,工艺过程如图1。进水 pH 为 $5.5 \sim 6.0$, $220 \text{ mg/L SO}_4^{2-}$, $300 \sim 400 \text{ mg/L Ni}^{2+}$, 60 mg/L Cl^- , θ 为 $5 \sim 25^\circ\text{C}$ 。

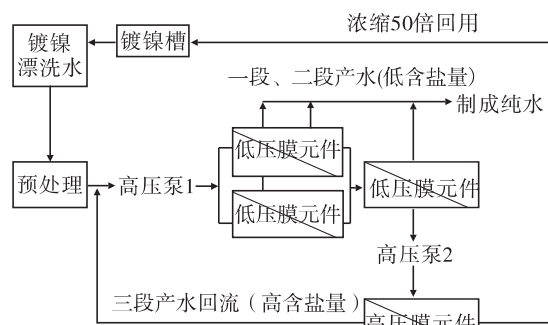


图1 镀镍废水膜法浓缩回用工艺

低压产水为一级两段,使用12支反渗透膜,操作 p 为 1.5 MPa (高压泵扬程 178 m),进水 $5 \text{ m}^3/\text{h}$,产水率 79.5% ,透盐率 2.75% ,能耗 0.45 kWh/m^3 。高压浓缩为一级一段6支反渗透膜元件,操作 p 为 6.5 MPa (高压泵扬程 800 m),进水量 $1 \text{ m}^3/\text{h}$,回收率 88% ,能耗 2.3 kWh/m^3 ,镍被浓缩50倍后回用,淡水作为一级膜进水,提高水回收率。整个系统能耗率为 $0.91 \sim 1.10 \text{ kWh/m}^3$ 。

刘济阳^[3]等介绍的某公司连续化带状泡沫镍的含镍废水处理,该公司同国家海洋局杭州水处理中心合作,采用膜分离方法处理电镀废水,回收镍和水资源,工艺流程如图2。

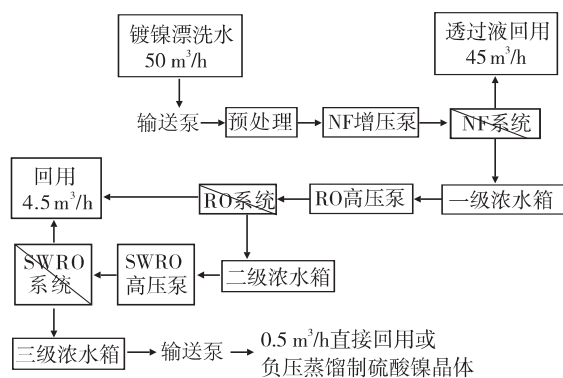


图2 镍镍废水膜分离浓缩工艺流程

含镍清洗水 pH 为 4.8 ~ 5.2, $411 \text{ mg/L SO}_4^{2-}$ 、 $50 \sim 300 \text{ mg/L Ni}^{2+}$ 、 50 mg/L 硼酸、 58 mg/L Cl^- 、 0.5 mg/L 糖精。50 m³/h 的清洗水经预处理、一级纳滤产水、二级反渗透浓缩、三级海水反渗透 (SWRO) 浓缩, 镍浓缩液直接回用或负压蒸馏制硫酸镍晶体。年处理水 30 万 t, 水和镍的回用率均达 95%。年化学药剂、电费、人工、膜更换及蒸汽支出分别为 3、31.2、4.8、25、30 万元, 年运行费用 94 万元。折算电费约 1.04 元/m³, 运行费约 3.13 元/m³。

镍回收处理工艺一般含砂滤、炭滤、微滤、纳滤和反渗透。回收金属也回收水, 流程较长, 占地面积较大, 投资和运行成本较高, 不考虑金属价值, 水成本 3 ~ 8 元/t^[2-3, 14]。在线水循环主要是回收有价金属工艺的辅助过程, 当回收金属无法用于镀槽时, 水循环同步中止。在线水循环由于反渗透膜透过淡水含有微量无机盐和有机物, 直接回用于清洗槽的末端可能会引起下道镀铬工序的交叉污染。

在线水循环水质可控, 悬浮物较少, 基础设施改变较少, 能发挥反渗透的灵活性和便利性, 节水节能节约成本, 可以避免反渗透浓水处理, 规避总量控制和浓度控制的冲突, 降低分质分流的基础设施投资, 降低污水处理成本。在线水循环融合了废水处理、源头减量、资源回收于一体, 将是电镀企业清洁生产首选方向。

2.3 末端回用

末端水回用指经预处理(氰氧化、铬还原)的电镀综合废水不经传统的混凝、沉淀及过滤等常规水处理技术或混凝后直接过滤, 经反渗透后淡水回收水用于生产, 水回用点与原水位置不尽相同。

胡齐福等^[18]采用反渗透处理技术, 处理水暖、卫生洁具工件的装饰性电镀中镀镍漂洗废水, 工艺流程如图 3。

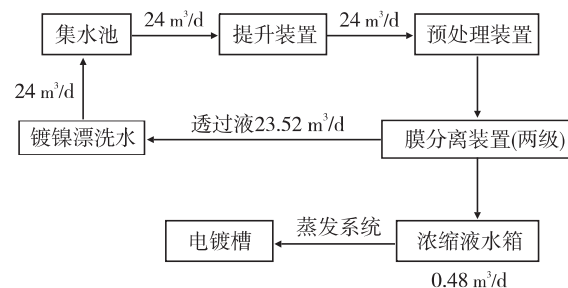


图3 镍镍废水膜分离工艺流程

预处理系统由袋式滤器(0.35 ~ 0.38 MPa, $5 \mu\text{m}$ 孔径 PP 滤袋)、除油过滤器(0.31 ~ 0.35 MPa)及保安过滤器(0.28 ~ 0.32 MPa, $5 \mu\text{m}$ 的 PP 滤芯)组成。一级反渗透系统处理量 $1 \text{ m}^3/\text{h}$, $320 \sim 350 \text{ mg/L}$ 镍离子, pH 为 5 ~ 7, 光亮剂等含少量有机物, 运行 p 为 1.5 MPa, 膜组件通量 800 L/h , 产生电导率 $\leq 15 \text{ mS/m}$, 浓缩倍数 5。二级反渗透进水 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$, $1600 \sim 1800 \text{ mg/L}$ 镍离子, pH 为 5 ~ 7, 运行 p 为 2.5 MPa。

镍截留率达 99.9% 以上, 水处理成本为 7.54 元/t。回收硫酸镍价值高, 经济效益较明显, 回收水的价值所占比例极低。此工艺类似于陈锋^[14]和刘济阳^[3]等的在线循环工艺, 差别在于电镀车间外或污水处理厂内进行。

马根等^[19]采用砂滤、微滤、纳滤及反渗透处理含铜、镍废水, 进水量 $9 \text{ m}^3/\text{h}$, pH 为 3 ~ 5, 75 mg/L Ni^{2+} 、 35 mg/L Cu^{2+} 、 60 mg/L CODcr , 工艺流程如图 4。

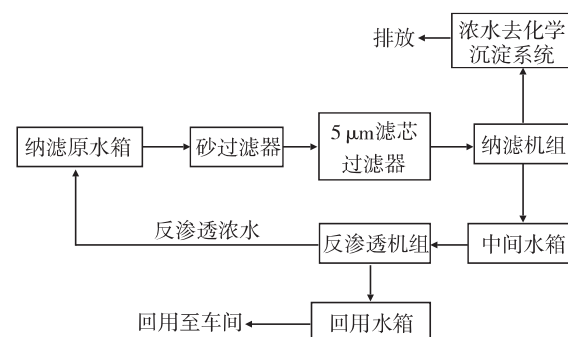


图4 电镀铜、镍废水膜分离工艺流程

纳滤浓水由化学处理系统处理达标排放, 纳滤淡水进入反渗透系统。反渗透淡水回用于生产线, 浓水回至纳滤进水。纳滤产水率维持在 85% 左右, 重金属离子去除率可达 95%, 反渗透产水率维持在 58% 左右, 脱盐率可达 99%, 出水电导率保持在 0.5 mS/m 以下。

白心平等^[120]采用预处理、交互平衡式膜分离-化学沉淀工艺(IBMS-CP)、纳滤、反渗透、浓液蒸发等工艺处理电镀综合废水如图 5。

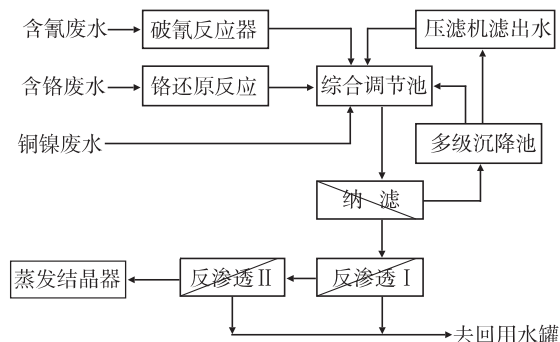


图 5 IBMS-CP 电镀废水处理工艺流程

IBMS-CP 工艺是纳滤系统嵌入化学沉淀过程中,并使化学沉淀和膜过程交互循环并达到动态平衡。经化学沉淀处理的废水,经过多级沉降池去除沉淀后与含有重金属的废水在调节池中混合,再进入纳滤膜单元分离浓缩,截留浓缩二价和高价重金属离子,透过一价盐,避免一价盐在系统中累积。纳滤淡水经两级反渗透再生后回用,浓液经蒸发结晶,系统结晶零排放或微排放。

重金属(主要为 Cr、Cu 和 Ni)的总质量浓度约为 140 mg/L,电导率 530 mS/m 时,整体系统的水回收率达 93%~96%,回用水水质稳定,重金属未检出,电导率小于 12 mS/m。

万宁等^[21]采用连续膜过滤、反渗透组合技术处理电镀漂洗水。预过滤分两级,第 1 级为石英砂过滤器,去除 50 μm 以上微滤,第 2 级采用保安过滤器,去除 5 μm 以上微滤、胶体或铁锈等杂质。

连续过滤(CMF)系统包括膜组件、机架和阀门等。膜组件为中空纤维外压式膜,材质为 PVDF,膜孔径 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ 。反渗透采用一级两段系统。工艺流程如图 6 所示。

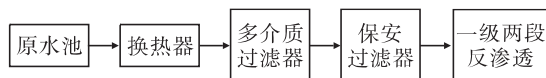


图 6 CMF-RO 电镀废水处理工艺流程

总进水量 280 m^3/d ,制备纯水 180 m^3/d ,系统运行费用约为 6.95 元/ m^3 ,低于 7.2 元/t 的自来水费。原水、CMF、RO 出水的主要指标平均值如表 1。

表 1 处理系统产水水质主要指标

项 目	原水水质	CMF 出水	RO 出水
pH	6.75	6.75	6.5
$\sigma / (\text{mS} \cdot \text{m}^{-1})$	60	50	6
$\rho_{\text{悬浮物}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	50	2.5	1.0
$\rho_{\text{BOD}_5} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	4.5	2.5	1.5
$\rho_{\text{COD}_{\text{Cr}}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	4.5	2.5	1.5
$\rho_{\text{全盐量}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	500	500	15
色度(倍)	260	210	5
$\rho_{\text{总溶固}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	500	500	25
$\rho_{\text{阴离子表面活性剂}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.1	0.1	0.1
总硬度(以 CaCO_3 计) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	350	350	15

夏健伟等^[22]介绍了 300 m^3/d 的含铜镍电镀废水超滤、反渗透回用案例,工艺流程如图 7。

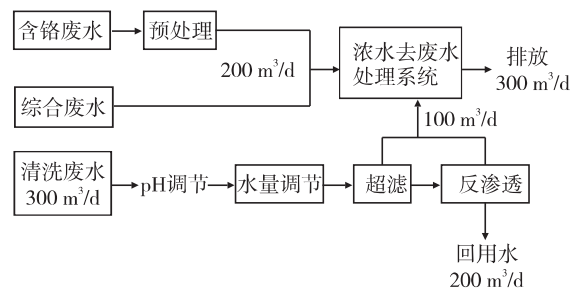


图 7 CMF-RO 电镀废水处理工艺

废水污染物为铜、镍,经由超滤和反渗透处理后,可回收 200 m^3/d 的高质量水。

进水电导率 82 mS/m,2.27 mg/L 铜、5.2 mg/L 镍,超滤出水铜、镍离子质量浓度分别为 1.63 和 11.1 mg/L,电导率 69.1 mS/m。

反渗透采用 18 支,一级三段式排列,最小产水量 20 m^3/h 。反渗透产水电导率 0.3~0.6 mS/m,水回收率 70%,产水铜镍未检出,处理费用 2.475 元/t。

砂滤、微滤、纳滤和反渗透等技术组合直接处理电镀综合废水,可增加原有污水处理设施的处理能力,改善生产扩张下废水处理设施的处理能力。可避免污水处理过程中添加化学药剂导致的含盐量增加,节约成本。部分水可直接回用。

2.4 中水回用

电镀中水指传统物理-化学或生物处理达标排放的电镀废水。中水再生即电镀中水经适当的技术处理后能够达到水回用的水质标准。

鄢豪等^[13]开展 850 m³/d 电镀中水回用研究, 工艺流程如图 8 所示。

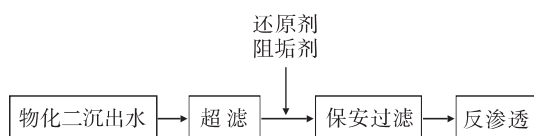


图 8 CMF-RO 电镀废水处理工艺流程

反渗透膜按照 4/10 + 6/6 (第 1 段 10 组 4 根, 第 2 段 6 组 6 根) 排列。当进水电导率 600 mS/m, 进水压力 1.6 MPa 时, 反渗透系统水回用率 65% ~ 85%, 产水电导率小于 200 mS/m, COD_{Cr} 质量浓度小于 20 mg/L, 重金属未检出, 废水总成本 2.42 元/t。

田苗等^[23]介绍线路板电镀废水的处理技术和中水回用工艺, 工艺流程如图 9。达标废水经砂滤-活性炭过滤后进入超滤系统, 然后用高压泵泵入反渗透系统处理。

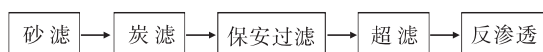


图 9 CMF-RO 电镀废水处理工艺流程

达标废水水质 pH 为 7.0 ~ 8.5, $\rho(\text{Cu}^{2+}) < 0.3$ mg/L, $\rho(\text{Ni}^{2+}) < 0.1$ mg/L, $\rho(\text{COD}) < 80$ mg/L。

超滤和反渗透系统产生 20% ~ 25% 浓水, $\rho(\text{COD})$ 约 150 ~ 200 mg/L, 电导率 800 ~ 1000 mS/m, 排入综合废水池与原废水合并处理。回用水 $\rho(\text{COD}) < 10$ mg/L, 电导率 < 120 mS/m。纯水不计折旧和人工运行成本 2.88 元/m³。

陈家明^[24]采用活性炭吸附、反渗透工艺处理电镀达标排放废水。设计产水量 1200 m³/d, 进水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 为 75 ~ 180 mg/L, pH 为 8 ~ 10, 产生率 80% ~ 85%。根据文献数据计算纯水总成本 3.18 元/t, 6 个月出水水质 COD_{Cr} 质量浓度平均为 32.6 mg/L。工艺流程如图 10。

YF-1 型多元化高效中水回用处理设备集加药、浮选、超滤于一体。活性炭吸附塔主要作用是脱氯、进一步去除大分子有机物和悬浮态无机物。反渗透浓水一部分回流进入调节池再处理, 一部分冲洗厕所。

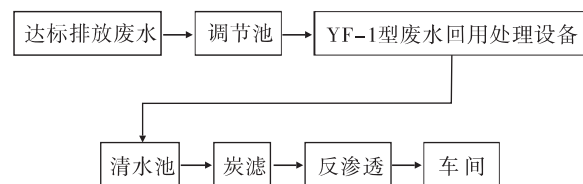


图 10 CMF-RO 电镀废水处理工艺流程

2.5 展望

减少镀件带入液和带出液, 提升清洗效率减少清洗水使用, 清洗水在线循环, 降低槽液维护频率等是缩减电镀废水和废水负荷的有效方法^[25]。廉价吸附剂(如天然吸附材料及其改性、工业副产品、农业和生物废弃物、改性生物高聚物和凝胶), 膜过滤、电渗析、光催化氧化肟根和络合剂、光催化还原 Cr(VI) 等是电镀废水治理的主要研究领域^[26]。反渗透技术在脱盐、废水再生和回用领域中占主流地位^[11], 反渗透脱盐成本与水中的含盐量和渗透压相关^[27]。采用吸附剂吸附和光催化氧化还原能减少传统废水处理中各种药剂用量, 减少废水含盐量, 降低能耗、物耗和反渗透浓水处理成本。

电镀废水再生基本使用反渗透技术, 工艺差别主要是反渗透膜进水的预处理和反渗透浓水处理系统。前者涉及运行成本和投资, 后者则可能是反渗透技术推广应用的瓶颈^[11]。反渗透进水的预处理包括砂滤、炭滤、微滤、超滤、纳滤、正渗透和消毒杀菌等。

Yang 等^[28]采用化学混凝、砂滤、超滤作为反渗透进水的预处理, 废水样来源于半导体制造厂, 含高浓度的纳米级无机颗粒, 浊度 1403 NTU, 悬浮固体 77.8 mg/L, COD 质量浓度 4.0 mg/L。化学混凝可以去除 98% 的浊度和颗粒, 混凝、砂滤之后使用超滤则可以去除 99% 的浊度和颗粒, 三级预处理对 COD 几乎没有去除。单独使用超滤, 超滤膜透水率较快下降。

Liu^[29]综述了正渗透的专利情况。正渗透(FO)作为脱盐预处理的工艺流程如图 11。正渗透和脱盐系统的组合不仅可用于废水再生, 还可应用于渗滤液、食品饮料等领域的废水处理。正渗透预处理能增加水回收率, 降低能耗, 减少膜污染。

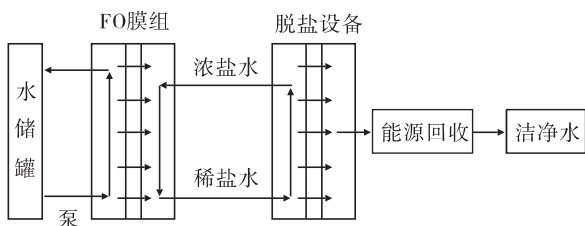


图 11 FO 预处理工艺流程

反渗透产生大量的浓水,含盐量高,需要特殊处理方可达标排放。反渗透浓水处理有热蒸发、浓缩结晶、喷雾干燥、电渗析、膜结晶及膜蒸馏等,或从中回收有价值的化学品,弥补操作成本,增加水回收率。或采用氧化、混凝及沉淀等传统工艺处理达标排放。或与其他水物理混合排放^[29]。反渗透浓水回用于传统废水处理设施二次处理,容易产生负荷积累,影响系统稳定运行。

Zhang 等^[30]用电渗析浓缩反渗透的浓水。电渗析淡水除 TOC 与反渗透进水有差异外,电导率、pH 等指标差别不大。淡水经臭氧氧化后能有效提高废水的可生化性,避免有机污染物在生化处理系统中累积。RO-ED 系统组合能够使水回收率达 95%。电渗析浓水与超滤浓水混合后外排。

3 结 论

电镀四种供水的成本和难度可以定性归纳如图 12 矩阵。纵坐标代表技术、经济、操作等综合难度,横坐标代表投资、操作、维护等综合成本。

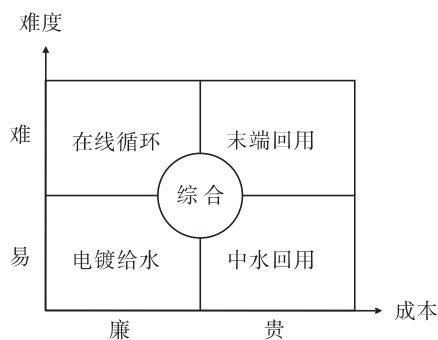


图 12 电镀给水难度—成本矩阵

当多种给水形式同时存在时,需要进行水回用综合风险评估,避免直观上的简单加权。增加中水回用率会挤出在线循环的用水量和给水用水量。

反渗透制纯水和在线水循环由于进水水质好,预处理流程较短,投资较少,处理成本较低,纯水成本 1~2 元/t。中水回用水质较复杂,含盐量和悬浮

物较多,预处理复杂,水回用管道复杂,再生水成本 2~4 元/t。末端水回用含混凝工艺,成本较高,类似常规化学处理,水成本约 4~10 元/t,扣除化学混凝部分,成本可能介于在线循环和中水回用之间。制水成本为名义价格,所含内容各有差异,相互间比较只能定性参考,有必要建立某个统一参数。

电镀的四种水源制水工艺一般都采用反渗透技术,各种工艺之间的差异在于能够根据水质情况选择合适的预处理工艺。新兴的正渗透技术可能会逐步应用于电镀废水再生的预处理,膜结晶、膜蒸馏可能也会应用于反渗透浓水的处理。

参考文献

- [1] 沈品华. 电镀废水治理方法探讨[J]. 电镀与环保, 1998, 18(3): 28-31.
- [2] 李峰, 吴欲, 胡如南. 我国电镀废水处理回用的现状及探讨[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(10): 17-20.
- [3] 刘济阳, 夏明芳, 张林生, 等. 膜分离技术处理电镀废水的研究及应用前景[J]. 污染防治技术, 2009, 22(3): 65-69.
- [4] 曾祥德. 闭路循环系统中的杂质问题探讨[J]. 材料保护, 1990, 23(11): 24-26.
- [5] 段光复. 电镀废水处理及回用技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 356-368.
- [6] 蔡权, 毛海荣. 电镀废水膜法回用工艺概况[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(12): 34-36.
- [7] 邵刚. 膜法水处理[M]. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 126-240.
- [8] 时钧, 袁权, 高从培. 膜技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 247-335.
- [9] USEPA. Membrane Filtration Guidance Manual [EB/OL]. (2005-11) [2013-01-09]. EPA815-R-06-009.
- [10] 胡立伟. 海水淡化(RO)应用风力发电的技术经济分析[J]. 珠江现代建设, 2012, 168(4): 25-28.
- [11] Vegt H, Iliev I, Tannock Q, et al. WIPO Patent Landscape Report on Desalination technologies and use of alternative energies for desalination [EB/OL]. (2011) [2013-01-09]. http://www.wipo.int/patentscope/en/programs/patent_landscapes/reports/desalination.html.
- [12] 张鸿斌, 杨丽丽. 论述膜技术在我国水和污水处理中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2011, (11): 85-87.
- [13] 鄢豪, 郑豪, 杨岳平, 等. 电镀综合废水的反渗透膜法回用研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2011, 38(5): 550-554.
- [14] 陈锋, 李松鹏, 张维新, 等. 电镀废水膜法浓缩回用工艺[J]. 电镀与环保, 2007, 27(5): 36-38.

- [15] 王占生, 刘文君. 微污染水源饮用水处理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 36-56.
- [16] 张西民. 反渗透技术在高温高压锅炉除盐水制备中的应用 [J]. 有色冶金节能, 2012, (5): 27-30.
- [17] 陆江祥. 《兰茜法》处理电镀废水的特点 [J]. 电镀与涂饰, 1989, (3): 58-60.
- [18] 胡齐福, 吴遵义, 黄德便, 等. 反渗透膜技术处理含镍废水 [J]. 水处理技术, 2007, 33(9): 72-74.
- [19] 马楫, 林振锋, 陈茂林, 等. 纳滤反渗透组合膜工艺在电镀废水处理回用中的应用研究 [J]. 环境保护, 2008, (18): 72-73.
- [20] 白心平, 郝文超, 许振良. 电镀废水的纳滤膜处理工艺及案例 [J]. 膜科学与技术, 2010, 30(5): 67-70.
- [21] 万宁, 徐亮. 膜技术在电镀漂洗废水处理与回用中的应用 [J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(8): 37-39.
- [22] 夏健伟, 朱丽华. 电镀工业废水排放量控制新技术及其效益分析 [J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2008, 21(1): 38-40.
- [23] 田苗, 蔡俊楠, 李向辉. 线路板与电镀废水处理与回用工艺 [J]. 广东化工, 2011, 38(7): 112-113.
- [24] 陈家明. 膜处理与活性炭吸附技术在电镀废水回用工程的应用 [J]. 广东化工, 2009, 36(10): 138-140.
- [25] EIPPCB. Surface Treatment of Metals and Plastics [EB/OL]. (2006-8) [2013-01-09]. <http://eippcb.jrc.es/reference/stm.html>
- [26] Barakat M A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2011, (4): 361-377.
- [27] Watereuse association desalination committee. Seawater Desalination Power Consumption White Paper [EB/OL]. (2011) [2013-01-09]. https://www.watereuse.org/sites/default/files/u8/Power_consumption_white_paper.pdf.
- [28] Yang B M, Huang C J, Lai W L, et al. Development of a three-stage system for the treatment and reclamation of wastewater containing nano-scale particles [J]. Desalination, 2012, 284: 182-190.
- [29] Liu L L, Wang M, Wang D, et al. Current patents of forward osmosis membrane process [J]. Recent Patents on Chemical Engineering, 2009, (2): 76-82.
- [30] Zhang Y, Ghyselbrecht K, Meesschaert B, et al. Electrodialysis on RO concentrate to improve water recovery in wastewater reclamation [J]. Journal of Membrane Science, 2011, (378): 101-110.

欢迎订阅 2014 年《现代涂料与涂装》

《现代涂料与涂装》期刊是由中昊北方涂料工业研究设计院有限公司主办的全国性科技期刊, 国内外公开发行, 国际连续出版物号: ISSN 1007-9548, 国内统一连续出版物号: CN 62-1135/TQ; 本刊是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数字化期刊群》全文收录期刊; 美国《化学文摘》(CA) 收录期刊。连续两届荣获全国石油和化工行业优秀期刊二等奖, 是国内外公开发行涂装行业的正式期刊。主要报道涂料、颜料及辅助材料的研究、开发、产业化及应用的创新情况, 侧重报道的国内外涂装行业的最新进展, 赋予本刊鲜明的应用特色, 搭建涂料与涂装工程师交流的技术平台。

本刊为月刊, 每月 20 日出版, 大 16 开本, 彩版印刷, 每期定价 15.00 元, 全年 12 期合计定价 180.00 元。如需挂号邮寄, 每期需另加挂号费 3.00 元(216.00 元)。

请根据您的方便, 选择以下方式订阅:

1. 通过当地邮局订阅, 国内邮发代号: 54-65

2. 直接向本刊编辑部订阅:

①通过邮局汇款至兰州市东岗东路 1477 号《现代涂料与涂装》编辑部, 邮编: 730020, 收款人: 刘芳;

②银行信汇 户名: 中昊北方涂料工业研究设计院有限公司; 开户行: 中国建设银行股份有限公司兰州拱星墩支行; 账号: 6200 1360 0190 5150 0638

2013 年本刊特推出“每期仅加 8 元 5 角, 期刊快递到您手”活动。快递送刊, 上门签收, 让您享受足不出户的便利。

网上订阅地址: www.mpf.com.cn

征订热线: 0931-8496343、8493208

传 真: 0931-8662104