

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.015

反渗透在不锈钢制品生产废水零排放工程中的应用

赵丽娟¹, 邵启运², 解清杰²

(1. 张家口市城乡建设规划设计院, 河北 张家口 075000; 2. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 以某不锈钢制品企业生产废水为研究对象, 针对其酸度高、毒性强、产量大、难处理的水质特征, 设计了以反渗透工艺为核心的基于“预处理+反渗透+MVR”组合的零排放工艺。运行结果表明, 在一、二、三段运行压力分别为 1.2、1.7、2.2 MPa 和浓水回流量均为 50% 的条件下, 经过反渗透系统的处理, 废水的电导率由 2 075 ~ 2 133 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 稳定降低至 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下; 对 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 88%、65%、88%、97% 以上; 废水回收率基本保持在 87% ~ 92% 之间, 系统总脱盐率达到 98% 以上。零排放系统总的运行费用为 56.83 元/ m^3 , 反渗透系统的运行费用为 5.35 元/ m^3 , 综合收益达 13.08 万元/年。

关键词: 反渗透; 不锈钢制品生产废水; 零排放

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0094-06

Application of Reverse Osmosis for Treatment of Stainless Steel Production Wastewater in a Zero Discharge Project

ZHAO Li-juan¹, SHAO Qi-yun², XIE Qing-jie²

(1. Zhangjiakou Urban and Rural Construction Planning and Design Institute, Zhangjiakou 075000, China; 2. College of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: As the wastewater from a stainless steel production enterprise is characterized by high acidity, strong toxicity, large flow rate and difficult to treat, a zero discharge project based on the combined process of pretreatment, reverse osmosis and MVR was designed with reverse osmosis process as the core technology. When the operating pressures of the first, second and third stages were 1.2 MPa, 1.7 MPa and 2.2 MPa, respectively, and the reflux rate of the concentrated water was 50%, the conductivity of the wastewater decreased steadily from 2 075 ~ 2 133 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to less than 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ after treatment by the reverse osmosis system. The average removal efficiencies of COD, $\text{NH}_3 - \text{N}$, TN and TP were above 88%, 65%, 88% and 97%, respectively. The recovery rate of the wastewater was between 87% and 92%, and the total desalination rate of the system was above 98%. The total operating cost of the zero discharge system was 56.83 yuan/ m^3 , among which the operating cost of the reverse osmosis system was 5.35 yuan/ m^3 . The comprehensive income of the process reached 130 800 yuan/year.

Key words: reverse osmosis; stainless steel production wastewater; zero discharge

通信作者: 解清杰 E-mail: 15951289455@163.com

不锈钢制品生产废水酸度高、毒性强、产量大、难处理,对环境和人类健康的威胁很大^[1-3]。从经济成本和环境保护角度出发,结合某不锈钢制品企业生产废水的特点,笔者设计了以反渗透(RO)技术为核心的处理系统,应用该系统后实现了90%以上的水资源回用,基本达到了生产废水零排放。本研究着重介绍了反渗透系统的设计与运行情况,通过系统的稳定运行,表明反渗透技术在不锈钢制品生产废水零排放项目中的应用可行。

1 反渗透系统工艺设计

本研究中不锈钢制品生产废水来源于车间酸洗、研磨和工艺冷却等工段的废水,水量为 $60\text{ m}^3/\text{d}$,pH值为1~2,COD、 NH_3-N 、TN、TP的平均浓度分别为4500、4.5、55、54 mg/L,电导率为 $4\ 230\sim 4\ 300\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 。针对进水水质特征及处理要求,该零排放工程的工艺流程如图1所示。

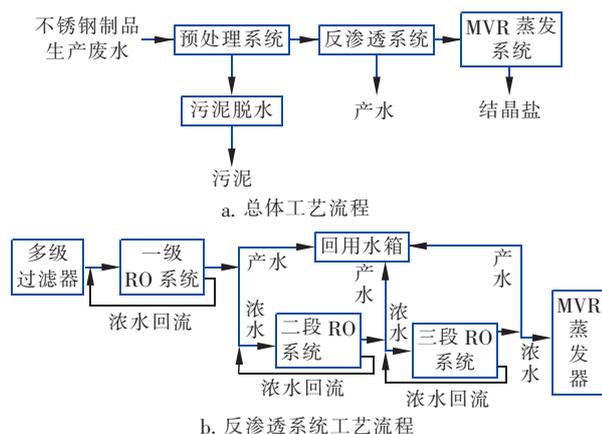


图1 工艺流程示意

Fig. 1 Flow chart of treatment process

预处理系统由“调节池+混凝/絮凝池+物化沉淀池+A/O—MBR+砂滤+炭滤+树脂软化”组成,原水首先泵入调节池调pH值,然后通过混凝沉淀、生化反应去除废水中的大部分污染物,再经过砂滤器、炭滤器和树脂软化器的共同作用进一步去除COD、SS和胶体等杂质,同时去除色度、异味、余氯并软化水质,使水质能够初步满足反渗透系统污染指数(SDI) <5 的进水要求。所有预处理单元都是为最大限度地防止和延缓污染物在反渗透膜面上的沉积,防止胶体及固体悬浮微粒的堵塞以及有机物、微生物、氧化性物质等对膜的破坏,延长反渗透膜的使用寿命^[4-5]。反渗透系统的主要作用是浓缩脱盐,保证出水含盐量符合回用要求,同时减轻后面

MVR蒸发系统的处理量。本研究中反渗透系统的设备清单见表1。

表1 反渗透系统设备清单

Tab. 1 Equipment list of reverse osmosis system

设备名称	设备参数
一段保安过滤器	过滤精度:5 μm ;流量:4 m^3/h ;滤芯:PP熔喷滤芯;1个
一段增压泵	型号:CHL4-30;流量:4 m^3/h ;扬程:23.5 m;功率:0.55 kW;1台
一段高压泵	型号:CDLS4-14;流量:4 m^3/h ;扬程:112 m;功率:3 kW;1台
一段反渗透膜系统	产水量(Q):1.5 m^3/h ;回收率:50%;2套
二段保安过滤器	过滤精度:5 μm ;流量:2 m^3/h ;滤芯:PP熔喷滤芯;1个
二段增压泵	型号:CHL2-50;流量:2 m^3/h ;扬程:36 m;功率:0.55 kW;1台
二段高压泵	型号:CDLS2-15;流量:2 m^3/h ;扬程:112 m;功率:1.5 kW;1台
二段反渗透膜系统	产水量(Q):0.8 m^3/h ;回收率:50%;2套
三段保安过滤器	过滤精度:5 μm ;流量:2 m^3/h ;滤芯:PP熔喷滤芯;1个
三段增压泵	型号:CHL2-50;流量:2 m^3/h ;扬程:36 m;功率:0.55 kW;1台
三段高压泵	型号:CDLS2-18;流量:2 m^3/h ;扬程:136 m;功率:2.2 kW;1台
三段反渗透膜系统	产水量(Q):0.4 m^3/h ;回收率:50%;2套
化学清洗水箱	容积:500 L;材质:PE;1个
化学清洗泵	型号:CHL4-30;流量:4 m^3/h ;扬程:23.5 m;功率:0.55 kW;1台

根据反渗透系统进水水质特征和回用要求,反渗透系统设计为一级三段系统,其中一段系统膜元件设计为18支/组,2组膜堆,设计回收率为50%;二段系统设计为12支/组,2组膜堆,设计回收率为50%;三段系统设计为8支/组,2组膜堆,设计回收率为50%。同时,为满足各段最小浓水量的设计要求,各段反渗透系统均设置浓水回流。

废水在进入反渗透系统前需要投加还原剂对其进行还原,降低氧化性,使水的氧化还原电位达到不超过300 mV的要求,防止废水对膜的腐蚀^[6]。同时,针对反渗透系统进水的水质情况,向进水中添加还原剂、阻垢剂(还原剂为普尼奥PO-400,阻垢剂为普尼奥PO-220,投加浓度均为3 mg/L),降低浓缩过程中膜结垢和被氧化的可能性^[7]。反渗透产

水进入回用水箱,具体产水水质:pH 值为 7.30 ~ 7.42(回用标准为 6.5 ~ 7.5);电导率为 27.17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (回用标准为 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$);COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP 分别为 14、0.42、0.49、0.04 mg/L ,相应回用标准为 50、2、6、2 mg/L ;SS、 Cr^{6+} 、 Ni^{2+} 均未检出。可见,产水水质完全满足企业回用标准;三段浓水进入 MVR 蒸发系统进行结晶处理,最终实现不锈钢制品生产废水处理系统的“零排放”。

2 反渗透系统进水水质

经过预处理后,反渗透系统进水 SDI 最大值为 2.9,符合反渗透 SDI < 5 的进水要求;进水 pH 值为 7.30 ~ 7.42^[8];进水电导率为 2 075 ~ 2 133 $\mu\text{S}/\text{cm}$;进水 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP 的平均浓度分别为 157、1.37、5.42、4.57 mg/L 。

3 反渗透系统的运行与膜清洗

3.1 运行压力对反渗透处理系统的影响

运行压力对产水电导率的影响如图 2 所示。可以看出,各段反渗透系统产水电导率的变化趋势相似,均随着运行压力的增大而逐渐减小。当一段反渗透系统运行压力分别为 1.0、1.2、1.4 MPa 时,一段反渗透系统的电导率从 17.27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 降至 15.34 $\mu\text{S}/\text{cm}$;当二段反渗透系统的运行压力分别为 1.5、1.7、1.9 MPa 时,二段反渗透系统的电导率从 35.46 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 下降至 33.56 $\mu\text{S}/\text{cm}$;当三段反渗透系统运行压力分别为 2.0、2.2、2.4 MPa 时,三段反渗透系统的电导率从 55.74 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 下降至 49.80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。这是因为反渗透运行压力增大,膜净压力增大,水分子透过膜的速率加快,产水量变大,但膜透盐量几乎不受压力的影响,因此产水电导率变小。

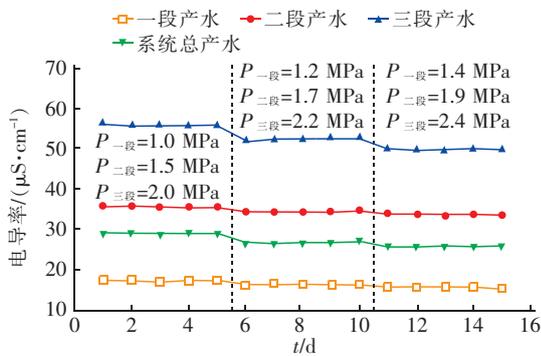


图 2 运行压力对产水电导率的影响

Fig. 2 Influence of operating pressure on conductivity of produced water

运行压力对产水水质的影响如图 3 所示。可

知,一方面随着运行压力的增大,反渗透系统产水 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除率逐渐增大,而 TN、TP 去除率几乎不受影响;另一方面反渗透系统对 COD、TN、TP 的去除率很高,对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除率相对较低。当一、二、三段运行压力分别为 1.0、1.5、2.0 MPa 时, COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 90.65%、68.65%、91.47%、99.12%;当一、二、三段运行压力分别为 1.2、1.7、2.2 MPa 时, COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 92.16%、69.96%、91.22%、99.17%;当一、二、三段运行压力分别为 1.4、1.9、2.4 MPa 时, COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 92.95%、71.09%、91.20%、98.06%。COD 去除率升高可能是因为反渗透膜对此类废水 COD 的传质驱动力大于浓差极化,使得压力增大,去除率升高;TN、TP 去除率变化不明显可能是由于膜的选择透过性。氨氮去除率相对较低可能有两种原因:一是水分子跟氨分子的大小相差不大,水分子及氨分子会选择性地通过反渗透膜;二是与进水 pH 值有关,反渗透系统进水 pH 值在 7.30 ~ 7.42 之间,在此条件下部分氨氮以氨气的形式存在,而反渗透膜对于气体几乎没有脱除作用,进而影响了对氨氮的去除效果。

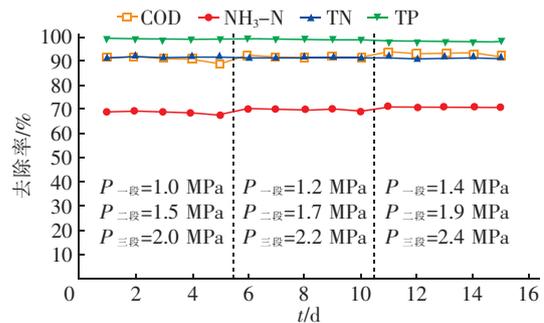


图 3 运行压力对产水水质的影响

Fig. 3 Influence of operating pressure on quality of produced water

运行压力对反渗透系统回收率的影响如图 4 所示。可知,运行压力增大,系统总回收率逐渐增加。当一、二、三段运行压力分别从 1.0、1.5、2.0 MPa 增加到 1.4、1.9、2.4 MPa 的过程中,系统总平均回收率升高明显,从 85.63% 升高到 88.30%。各段反渗透系统回收率和系统总回收率变化趋势相同,当一、二、三段运行压力升至 1.4、1.9、2.4 MPa 时,各段系统回收率均达到最大值,分别为 50.10%、50.39% 和 52.75%。这是因为运行压力增大导致反渗透产

水量增加,而进水量不变,故回收率增大。另一方面,运行压力越大,各段系统回收率增加幅度越低。这是因为随着反渗透系统的持续运行,膜表面会积累污染物,影响产水效率,系统回收率增幅降低。

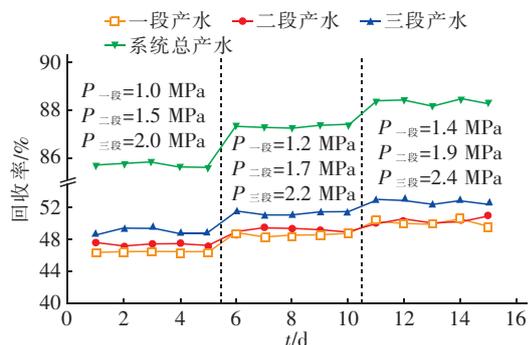


图4 运行压力对反渗透系统回收率的影响

Fig.4 Influence of operating pressure on recovery rate of reverse osmosis system

运行压力对反渗透系统脱盐率的影响表明,随着运行压力的增大,各段反渗透及系统总脱盐率逐渐增加,但增幅逐渐变小。当一、二、三段运行压力分别为1.0/1.5/2.0、1.2/1.7/2.2以及1.4/1.9/2.4 MPa时,一、二、三段平均脱盐率分别为99.17%/99.19%/99.28%、99.24%/99.21%/99.33%、99.27%/99.22%/99.35%;系统平均脱盐率分别为98.62%、98.73%、98.79%。这是因为运行压力增大,则产水量变大,而透盐量受进水压力的影响较小,所以产水含盐量降低,系统脱盐率升高。同时,运行压力的增大还导致了反渗透膜浓差极化增大、透盐量相对增高,故系统脱盐率增长变慢。

综合考虑以上因素,本研究中选用一、二、三段的运行压力分别为1.2、1.7、2.2 MPa。

3.2 浓水回流对反渗透运行效果的影响

根据系统实际运行情况,在其他条件不变的情况下,将浓水回流量定为给水总量的0、25%、50%、75%,探究其对反渗透系统运行效果的影响。浓水回流量对产水电导率的影响如图5所示。可知,当浓水回流量增加时,各段反渗透系统和系统总产水电导率增大,且浓水回流量越大,电导率增速越快。当浓水回流量为0时,一、二、三段反渗透系统和系统总产水电导率分别为16.39、33.11、50.40、26.56 $\mu\text{S}/\text{cm}$;当浓水回流量从0增至25%时,一、二、三段反渗透系统和系统总产水电导率分别增加了0.87、2.57、5.35、0.89 $\mu\text{S}/\text{cm}$;当浓水回流量从25%增大

到50%时,一、二、三段反渗透系统和系统总产水电导率分别增加了3.64、7.40、7.53、2.48 $\mu\text{S}/\text{cm}$;当浓水回流量从50%增大到75%时,一、二、三段反渗透系统和系统总产水电导率分别增加了10.14、12.17、10.86、6.53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。这是因为浓水回流量增大时,反渗透进水含盐量变大,导致膜透盐量、产水含盐量、电导率均增大。

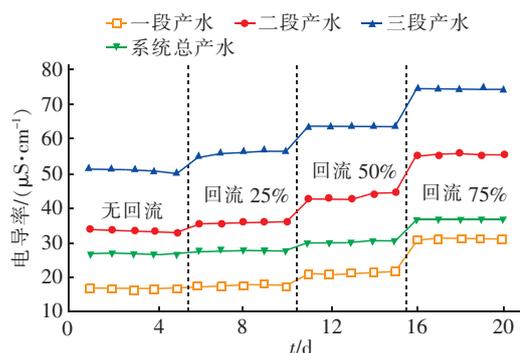


图5 浓水回流量对产水电导率的影响

Fig.5 Influence of reflux rate of concentrated water on conductivity of produced water

浓水回流量对产水水质的影响表明,当无浓水回流时,反渗透系统对COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP的平均去除率分别达到了93.07%、68.56%、91.65%、99.17%;当浓水回流量从0增至25%时,反渗透系统对COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP的平均去除率分别下降了2.26%、1.06%、1.26%、0.34%;当浓水回流量从25%增至50%时,反渗透系统对COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP的平均去除率分别下降了1.93%、2.17%、2.10%、1.07%;当浓水回流量从50%增大到75%时,反渗透系统对COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP的平均去除率分别下降了2.49%、3.42%、2.05%、1.05%。可见,随着浓水流量的增加,反渗透系统对COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP的去除率逐渐降低。这是因为浓水回流量增大时,反渗透进水含盐量增加,膜的渗透压增大,系统产水量减小,故对COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP的去除率下降。

浓水回流量对回收率的影响如图6所示。可以看出,当浓水回流量增大时,系统回收率增加,且浓水回流量增加越多,回收率增加越明显。当无浓水回流量时,一、二、三段反渗透系统平均回收率分别为50.22%、49.02%、51.71%,系统总回收率平均值为87.75%;当浓水回流量为25%时,一、二、三段反渗透系统平均回收率分别为51.60%、51.55%、

54.42%,系统总回收率平均值为89.31%;当浓水回流量为50%时,一、二、三段反渗透系统平均回收率分别为53.48%、59.33%、62.96%,系统总回收率平均值为92.99%;当浓水回流量达到75%时,一、二、三段反渗透系统的平均回收率分别为61.22%、78.53%、74.53%,系统总回收率的平均值为97.88%。这是因为浓水回流量增大时,反渗透进水量和产水量都变小,但进水量减少更多,故回收率增大;同时,浓水回流量增加越多,反渗透的进水量和产水量相差越大,回收率增加越明显。可见,浓水回流有助于提高反渗透系统的回收率。

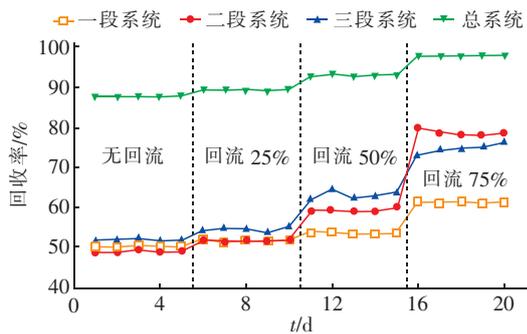


图6 浓水回流量对回收率的影响

Fig. 6 Influence of reflux rate of concentrated water on recovery rate

浓水回流量对脱盐率的影响如图7所示。

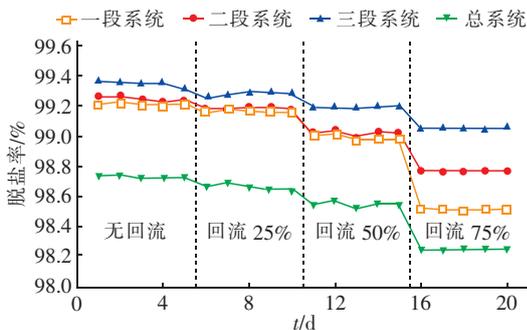


图7 浓水回流量对脱盐率的影响

Fig. 7 Influence of reflux rate of concentrated water on desalination rate

由图7可知,当无浓水回流时,一、二、三段反渗透和系统总平均脱盐率分别为99.21%、99.25%、99.34%、98.73%;当浓水回流量增加至25%时,一、二、三段反渗透系统和系统总平均脱盐率分别下降了0.05%、0.06%、0.07%、0.07%;当浓水回流量增至50%时,一、二、三段反渗透系统和系统总平均脱盐率分别下降了0.17%、0.17%、0.08%、0.11%;当浓水回流量增至75%时,一、二、三段反

渗透系统和系统总平均脱盐率分别下降了0.48%、0.25%、0.14%、0.30%。可以看出,随着浓水回流量增加,反渗透系统脱盐率下降,且浓水回流量越大脱盐率下降越快。原因同上,当浓水回流量增大时,反渗透进水含盐量增加,膜两侧盐浓度差增大,透盐率增大,产水含盐量变大,但进水含盐量不变,故系统脱盐率降低。同时,浓水回流量提高越大,浓差极化越严重,膜透盐量越大,脱盐率下降越快^[9]。

综合考虑以上因素,本研究中选择浓水回流量为总给水量50%。

3.3 反渗透系统清洗分析

反渗透系统运行过程中,在杂质的影响下反渗透膜会发生膜污染情况,因此系统运行期间,要定期对膜元件进行清洗,尽量避免膜污染的发生。实际运行情况表明,当系统运行稳定时,若反渗透系统的产水量下降5%~10%,就需要对系统进行反冲洗。反冲洗系统主要由反冲洗保安过滤器、反冲洗水泵和反冲洗水箱组成。根据污染物种类和膜污染程度的不同,反冲洗又可分为酸洗、碱洗等方法。本研究中2020年12月反渗透系统膜污染比较严重,系统运行效率降低,产水量下降约18%,系统采用先酸(0.2%的盐酸)后碱(0.1%的氢氧化钠)的方法进行反冲洗,清洗效果良好,膜通量基本能恢复到设计值的96%左右。

4 运行费用及综合收益分析

4.1 运行费用

对零排放系统运行费用进行核算,其中电费6.0元/m³、人工费2.2元/m³、药剂费29.65元/m³、膜折旧费用0.89元/m³、滤料更换费用0.17元/m³、综合污泥费7.5元/m³、危废委外费用10.42元/m³,零排放系统运行费用约为56.83元/m³。

对反渗透系统运行电能、药剂消耗进行核算,其中电费按0.6元/(kW·h)核算,功率因子以0.8计,用电量为11kW·h/d;药剂主要包括还原剂和阻垢剂,二者均按3mg/L进行投加,其中还原剂按10元/kg、阻垢剂按13元/kg计,反渗透系统运行费用约为5.35元/m³。

4.2 综合收益

零排放系统的收益包括纯水收益和冷凝水收益。其中回收纯水52.5m³/d(回收率按87.5%计算),回收纯水价值按7.5元/m³计算,则回收纯水的收益为11.81万元/年;冷凝水回收7.4m³/d,回

收冷凝水价值按 5.7 元/m³ 计算,回收冷凝水的收益为 1.27 万元/年,综合收益为 13.08 万元/年。

5 结论

① 当反渗透运行压力增大时,产水量明显增加,在最大压力下,一、二、三段平均产水量和系统总平均产水量分别为 2.06、1.03、0.54、3.62 m³/h。回收率、脱盐率及 COD、NH₃-N、TN、TP 的去除率也与产水量的变化趋势相似,均随着运行压力的升高而增大。但电导率随着压力的增加而减小,这是因为产水量增加时,透盐量几乎不变,导致电导率减小。另一方面,运行压力增大导致反渗透膜浓差极化变大,膜性能下降,反渗透系统产水水质、产水量、回收率、脱盐率的变化趋势变缓。本研究中选择一、二、三段的运行压力分别为 1.2、1.7、2.2 MPa。

② 当反渗透浓水回流量增加时,进水含盐量增加,膜的渗透压增大,产水量、脱盐率均减小,回收率和电导率反而增大。另一方面,浓水回流量增加,反渗透膜浓差极化变大,膜性能下降,透盐量增大,反渗透系统产水水质、产水量、回收率、脱盐率的变化趋势变快。本研究中选择各段系统浓水回流量为总给流量的 50%。

③ 反渗透系统运行稳定,各项水质指标均达到设计要求,零排放系统总的运行费用为 56.83 元/m³,反渗透系统的运行费用为 5.35 元/m³,综合收益为 13.08 万元/年。

参考文献:

- [1] 黄万抚,何善媛. 钢铁酸洗废水处理与回收利用[J]. 冶金丛刊,2005(5):33-36,39.
HUANG Wanfu, HE Shanyuan. Treatment and recycle of steel-pickling liquid waste[J]. Metallurgical Collections, 2005(5):33-36,39(in Chinese).
- [2] 高亮. 不锈钢酸洗废水处理中的污泥减排技术[J]. 中国给水排水,2009,25(10):83-86.
GAO Liang. Sludge reduction technology in stainless steel acid cleaning wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(10):83-86(in Chinese).
- [3] 尹建云. 不锈钢酸洗废水中金属离子的资源化利用研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
YIN Jianyun. Research on Resource Utilization of Metal Ions from Spent Steel Pickling Wastewater [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017(in Chinese).
- [4] 赵芳,仲惟雷,姜春东,等. 反渗透技术在化纤厂污水回用项目中的应用[J]. 工业水处理,2015,35(4):104-106.
ZHAO Fang, ZHONG Weilei, JIANG Chundong, et al. Application of RO technology to the wastewater reuse project in a chemical fiber plant[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(4):104-106(in Chinese).
- [5] 薛梦婷,李勇,杨肖满,等. 电子厂电镀废水反渗透含镍浓水处理工程实例[J]. 电镀与涂饰,2018,37(11):508-511.
XUE Mengting, LI Yong, YANG Xiaoman, et al. A case for treatment of nickel-containing concentrate produced by reverse osmosis of electroplating wastewater in an electronic manufacturer[J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37(11):508-511(in Chinese).
- [6] 唐伟峰. 二级二段反渗透膜的应用研究[J]. 清洗世界,2013,29(7):4-8.
TANG Weifeng. Research for application of two grade two-stage reverse osmosis membrane [J]. Cleaning World, 2013, 29(7):4-8(in Chinese).
- [7] 王金龙. 双膜法处理污水厂出水用于工业回用[J]. 中国给水排水,2020,36(4):66-70.
WANG Jinlong. Treatment of wastewater treatment plant effluent by UF-RO for industrial reuse[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(4):66-70(in Chinese).
- [8] 宋杰,于慧,吴非洋,等. 测试液 pH 值对 RO 膜元件渗透性能测试结果的影响[J]. 中国给水排水,2017,33(21):44-47.
SONG Jie, YU Hui, WU Feiyang, et al. Impact of feed pH on permeation and separation of reverse osmosis membrane element [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(21):44-47(in Chinese).
- [9] 郭诗韵. 多级膜法处理含镍废水的应用研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2020.
GUO Shiyun. Study on the Application of Multistage Membrane Process in the Treatment of Wastewater Containing Nickel [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020(in Chinese).

作者简介:赵丽娟(1977-),女,河北邯郸人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为市政给排水设计。

E-mail:383249831@qq.com

收稿日期:2021-05-01

修回日期:2021-06-07

(编辑:任莹莹)