

# 海水淡化在海岛应用的工程案例

杨树军, 周冲, 晏鹏

(国家海洋局 天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

**摘要:** 以三沙市海水淡化工程为例,其产水量为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,预处理部分由斜管沉淀池、管道过滤器组成,深度处理采用了PVDF管式超滤、RO系统的组合。该设备在运行的一年多时间里,处理效果稳定,出水水质达到了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。由于采用了能量回收系统,使得膜法海水淡化技术具有了一定的经济效益和社会效益。

**关键词:** 海岛; 海水淡化; 能量回收; RO系统

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)06-0089-04

## Case Study on Desalination Application in an Island

YANG Shu-jun, ZHOU Chong, YAN Peng

(The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, SOA <Tianjin>, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** The desalination project with the treatment capacity of  $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$  in Sansha City was introduced as a case. The pretreatment is composed of inclined tube sedimentation tank and pipeline filter, while the advanced treatment adopts combined process of PVDF tube ultrafiltration and RO system. Through over one-year operation, the effluent could stably reach *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006) and energy recovery system is also adopted, which makes the membrane desalination technology more economic and social benefits.

**Key words:** island; desalination; energy recovery; RO system

我国的淡水资源一直处于紧缺的状态。随着技术的进步,海水淡化在越来越多的城市有了应用,尤其是沿海和岛屿地区,向大海要淡水是大势所趋。与长距离调配水源相比,海水淡化具有见效周期短、水量稳定、水质稳定等优点<sup>[1]</sup>。目前,海水淡化以膜法反渗透、低温多效、多级闪蒸等作为主流技术<sup>[2]</sup>,其中膜法的实际应用最为广泛。能量回收技术的成熟和广泛应用,对膜法海水淡化的产水能耗降低起到了至关重要的作用。

三沙市是我国最年轻的地级市,市府位于永兴岛,地处我国南海海域。在还没有海水淡化装置的年代,岛上的军民主要依靠地下水、雨水等方式获得生活用水,水质、水量无法得到保障。随着交通的便利,政府通过船只为驻岛人员运输淡水。由于船运

受天气等客观因素影响较大,经过调研,三沙市政府决定由天津海水淡化与综合利用研究所在永兴岛建造 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 产水量的海水淡化装置一套,以满足永兴岛居民生活饮用水的需求,并于2016年第二季度开工建设,同年10月投入使用。

### 1 原水水质

原水为我国南海海域海水,电导率为 $45\,000\sim 46\,000\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ ,水温为 $20\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ ,pH值为 $7.5\sim 8.5$ ,ORP为 $-200\sim -10\text{ mV}$ ,其他指标见表1。该海水淡化厂处理能力为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,原海水经过斜管沉淀池和超滤系统的预处理后,进入两级反渗透进行脱盐。一级产水作为普通生活用水,用于洗衣、洗澡等,二级产水用于饮用和做饭等。产水全部供应给全岛军民使用。由于我国尚没有关于海水淡化

水的标准,相关的检测均采用《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)<sup>[3,4]</sup>。

表1 原海水指标

Tab.1 Seawater indicators  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	数 值
钠	11 000 ~ 12 000
氟化物	10 ~ 12
氯化物	20 000 ~ 22 000
钙	390 ~ 450
硫酸盐	2 800 ~ 3 500
镁	1 200 ~ 1 500
钾	400 ~ 450
硝酸盐氮	4 000 ~ 4 300

## 2 工艺流程

海水淡化工艺流程见图1。

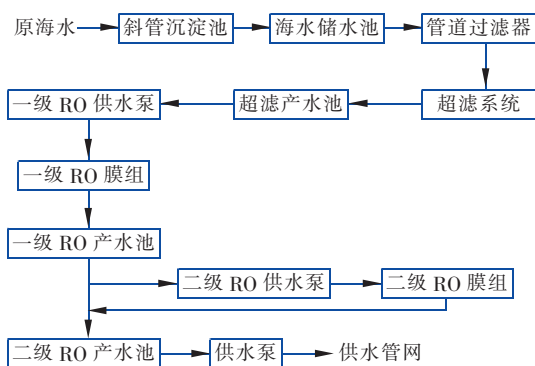


图1 海水淡化工艺流程

Fig.1 Flow chart of seawater desalination

本工程使用潜水泵在近海码头处直接取水。原海水通过输送管路进入斜管沉淀池。采用斜管沉淀池可以降低原水浊度,同时配有絮凝剂和杀生剂加药系统,通过絮凝剂的作用使胶体等悬浮物凝聚成更大颗粒通过沉淀去除,投加杀生剂可以灭活原水中的微生物和藻类等,为后续超滤系统更稳定的运行提供了保障,同时也延长了反洗周期。

沉淀池的出水进入海水储水池,作为超滤前的水力缓冲。进入超滤前设置了管道过滤器,以防止较大的机械颗粒阻塞超滤中空纤维膜的进水通道,导致产水量降低,严重时可能会损坏膜元件。

管道过滤器的出水进入超滤系统,超滤系统作为海水淡化反渗透系统的预处理工艺,可以去除海水中的胶体、病毒、细菌、悬浮物等物质,降低原水浊度,以保证反渗透系统在长期运行中更加稳定。超滤产水进入两级反渗透系统进行脱盐,产水再经输

送管路配给到用水点。

## 3 主要构筑物及设备参数

### 3.1 斜管沉淀池及海水储水池

1座,钢混结构,长为15 m,宽为4 m,深为4 m,采用异向流斜板,表面负荷为 $2.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,斜管倾角为 $60^\circ$ 。絮凝剂加药系统包括溶液箱、加药泵及搅拌器,加药量手动调整。杀生剂通过次氯酸钠发生器制作,对原海水中的细菌、病毒等微生物进行灭活,否则这些微生物会堵塞超滤膜的膜孔,影响超滤系统的稳定运行。

### 3.2 海水储水池

1座,钢混结构,长为15 m,宽为2 m,深为4 m。储水池的设置主要是为了后端的超滤系统进行压力缓冲,进出口设置对夹法兰式阀门,并配有排空阀,便于日常维护。

### 3.3 管道过滤器

超滤前端并联安装了两台过滤精度为 $100 \mu\text{m}$ 的自清洗式管道过滤器,可截留预处理水池中粒径 $>100 \mu\text{m}$ 的机械颗粒,防止进入超滤装置。较大的机械颗粒会污堵超滤进水孔,影响进水量,从而降低产水量,甚至会对膜丝表面造成不可逆的划伤,形成串水,降低产水水质,提高维护成本。过滤器的进、出口都设有压力监控装置,目的是在进、出口压差增大,即污堵严重时进行滤网的自清洁。当两侧的压差达到 $0.05 \text{ MPa}$ 时过滤器内部的旋转刷会转动,将截留在滤网上的机械杂质清扫下来,同时排污阀打开,排放掉杂质。整个反洗过程需要 $15 \sim 60 \text{ s}$ ,也可根据现场实际情况适当调整清洗排污的时间。

### 3.4 超滤系统

超滤装置设置两台单级离心进水泵,互为备用,流量为 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为 $250 \text{ kPa}$ 。进水泵采用变频控制,控制参数为海水储水池的液位、超滤产水池液位以及超滤进水侧的压力。当海水储水池处于低液位时,进水泵会自动停止并发出报警信号;压力信号的作用是调整泵的转速,保持各超滤装置进水压力的恒定。

超滤系统采用外压式进水,原水从膜丝外表面渗入膜丝内部,产水从中心管流出,汇集到产水池。浓缩的原水被截留在膜丝外部,为了提高错流速度,在一定程度上起到冲刷外表面的作用,该系统将一部分浓缩液排回原海水箱,提高了浓缩水的流速,可以降低浓差极化现象,减少污染物的积累。通过这

种方式,降低了超滤系统频繁反洗的频率,提高了回收率和产水效率。

超滤系统设备采用框架式结构,系统共配置2组超滤装置,每组设置36只膜组件。超滤系统设计的单套恒定出力为 $1\,350\text{ m}^3/\text{d}$ ,当其中一套超滤设备处于正冲、反冲或化学清洗过程时,另外一套超滤装置可通过采用提高工作流量的方式保持系统的恒定产水量。

超滤系统配有反洗设备,主要包括:反洗泵2台以及阀门、仪表、管路等。反洗泵1用1备,流量为 $90\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为300 kPa。反洗泵采用变频控制。

另外,超滤系统还设置化学清洗设备,包括:清洗罐1个,有效容积为 $7\text{ m}^3$ ;清洗泵2台,流量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为300 kPa,两台泵同时工作。化学清洗周期一般为每两个月进行药洗一次,一次清洗时间为 $10\sim 24\text{ h}$ 。

### 3.5 RO系统

#### ① 一级RO系统

一级反渗透供水泵为卧式离心泵,出力为 $56.25\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为250 kPa。采用变频控制,可根据系统设定调节出水量。一级反渗透高压泵为反渗透膜组提供足够的进水压力,维持反渗透膜的正常运行。其出力为 $22.5\text{ m}^3/\text{h}$ ,压力为5.50 MPa。进、出口安装高低压保护开关,进水压力过低或出水压力过高时将停泵,并将报警信息传送给操作人员。

在膜法海水淡化过程中,浓缩水侧有着非常高的压力,数值非常接近进水侧,最低要40 MPa以上。这部分能量如果直接排出系统,会造成非常大的浪费。本装置安装了浓水能量回收装置(PX),能量回收率 $>93\%$ 。基本原理是高动能浓缩水在回收装置中通过多个液缸将能量传递给低压力的原海水,使低压原海水具有了较高的动能。但是这个压力还是低于高压泵的出口压力,为了补偿这部分压力,还

另外配备了增压泵。每个膜堆设置1台增压泵,把这部分海水的压力提升至RO膜所要求的压力值。泵出力为 $33.75\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为400 kPa。采用变频控制,可根据设定水量及压力自动调节。

一级反渗透共设置3组膜堆,2用1备,每组膜堆采用一级一段排列,膜126支,膜壳21根,系统回收率 $\geq 40\%$ 。

根据工艺需要系统设置了海水淡化一级反渗透产水池1座,容积约 $150\text{ m}^3$ ,用来缓存部分一级反渗透产水,并为二级反渗透提供一定的缓冲。

#### ② 二级RO系统

二级反渗透系统单独配有立式离心供水泵,为高压泵提供一定给水压力的进水。泵出力为 $16.25\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为200 kPa。

二级反渗透膜组高压泵出力为 $16.25\text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程为820 kPa。进、出口同样加装压力保护开关,在进水压力过低或出水压力过高时将报警及停泵,对膜进行保护。

根据一级产水的含盐量选择低压反渗透膜。二级反渗透设置两组膜堆,采用二段式排列(2:1),膜36支,膜壳6根。

二级反渗透浓水排水侧安装有流量控制阀,可以手动调节,以控制水的回收率 $\geq 85\%$ 。

根据工艺需要,系统设置了二级反渗透产水池1座,容积约 $350\text{ m}^3$ ,用来储存系统产出的淡化水。

### 4 运行效果

该海水淡化反渗透系统处理量为 $3\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,包括预处理系统、超滤膜系统、反渗透脱盐系统,运行一个月后的效果见表2。从表2可以看出,经过膜法深度处理后,脱盐率 $>99\%$ ,主要离子去除率 $>98\%$ 。目前该设备已经运行1年左右,中途由于产水电导率的提高进行了膜清洗,基本恢复了最初的运行效果。

表2 出水水质

Tab.2 Effluent quality

项目	pH值	氯化物/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	硫酸盐/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	钙/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	镁/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	钠/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	氟化物/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	硝酸盐氮/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	电导率/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
一级RO产水	7.5~8.0	90~100	$<1.0$	$<0.2$	$<1$	$<100$	$<0.2$	$<0.2$	$<400$
二级RO产水	7.5~8.0	1.0~2.0	$<0.2$	$<0.05$	$<0.05$	$<2$	$<0.2$	$<0.2$	$<20$

### 5 效益分析

运行成本包括电费、药剂费用、膜更换费用。其

中每吨产水耗电量为 $3.7\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,永兴岛的电价为 $1.8\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,每吨产水药剂、保安过滤器滤芯

等耗材费用为3.2元,反渗透膜使用寿命以3年计,每吨产水膜更换费用为0.54元/ $\text{m}^3$ ,人工费约3元/ $\text{m}^3$ ,总计产水成本约13元/ $\text{m}^3$ 。通过能量回收装置的应用,系统的能耗相比于以往未采用该装置的淡化工程降低了60%左右,节能效果突出,吨产水费用也同时降低了40%左右。

## 6 结论

双膜法的反渗透代表了国际海水淡化的发展方向,连续超滤作为预处理降低了化学药剂的加入量,体现了环境友好性。在反渗透装置中采用高效的PX能量回收装置,先进的能量回收技术降低了电耗,使每吨产水电耗控制在 $4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 以下,明显降低了反渗透海水淡化装置制水成本。在一年多的运行时间里,出水效果稳定,为全岛军民的生活用水提供了可靠保障。

## 参考文献:

- [1] 冯厚军,齐春华,徐克,等. 我国海水淡化技术及产业发展问题与建议[J]. 中国给水排水,2015,31(12):31-34.  
Feng Houjun, Qi Chunhua, Xu Ke, *et al.* Problems and suggestions on seawater desalination technologies and industry development in China [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(12): 31-34 (in Chinese).
- [2] 阮国岭,冯厚军. 国内外海水淡化技术的进展[J]. 中国给水排水,2008,24(20):86-90.  
Ruan Guoling, Feng Houjun. Technical progress in seawater desalination technology at home and abroad[J].

China Water & Wastewater, 2008, 24(20): 86-90 (in Chinese).

- [3] 王晓楠,潘献辉,刘昱,等. 反渗透膜法海水淡化产品水质影响因素分析[J]. 中国给水排水,2015,31(8):37-42.  
Wang Xiaonan, Pan Xianhui, Liu Yu, *et al.* Analysis on influencing factor of quality of product water from seawater desalination by reverse osmosis membrane [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 37-42 (in Chinese).
- [4] Liat Birnhack, Roni Penn, Ori Lahav. Quality criteria for desalinated water and introduction of a novel, cost effective and advantageous post treatment process[J]. Desalination, 2008, 221(1/3): 70-83.



作者简介:杨树军(1985-),男,天津人,硕士,工程师,主要从事膜法水处理设计与应用研究。

E-mail: 452722341@qq.com

收稿日期:2017-08-23

珍惜资源,保护环境,建设美丽中国