

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.022

运行7年污水源脱盐中水厂的提量提标改造

王金龙

(青岛锦龙弘业环保有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 某脱盐中水厂以双膜工艺为核心,采用短流程布置方式,设计产水规模 2×10^4 m³/d,以污水处理厂一级A达标出水为原水,产水电导率 <200 μ S/cm,已运行近7年,基本满负荷运行。由于园区用户用水量增加,该厂需扩容25%,在提量的同时进行提标改造,而改造面临占地受限、脱盐要求和供水保障率要求高、膜老化、原水电导率高等问题。通过将已使用近7年的双膜更换、超滤建设双层增加2组、拆除原3组二级RO增加2组一级RO、引入优质原水水源等综合方式,实现原位提量25%,并实现产水电导率 <150 μ S/cm。其中,反渗透采用国产膜实现了对进口膜的部分替代。建议多组系统生产过程中尝试包括国产膜在内多种新产品,在实践中检验技术经济指标,为后续换膜积累数据,实现用户效益最大化。在设计方面,对于污水源双膜工艺,短流程具备可行性,但应关注设计温度、产率系数、原水水质取值准确性,反渗透设计应有一定余量。

关键词: 中水; 脱盐; 超滤; 反渗透; 扩容; 膜更换

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)16-0126-05

Upgrading of Capacity and Standards for Sewage Desalination in a Reclaimed Water Treatment Plant after Operation for 7 Years

WANG Jin-long

(Qingdao Jinlonghongye Environmental Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: A reclaimed water desalination plant with UF-RO membrane process as the core and a short process layout, is designed with a water production capacity of 20 000 m³/d. It uses the effluent of a sewage treatment plant meeting I-A standard as raw water, with effluent conductivity less than 200 μ S/cm. It has been in operation for nearly 7 years basically at full capacity. Due to the increase in water consumption of users in the park, the plant needs to expand by 25% and upgrade the standard at the same time. The retrofitting faces problems such as limited land occupation, high requirements for desalination and water supply guarantee rate, membrane aging, and high conductivity of raw water. By replacing the double membrane that has been in use for nearly 7 years, adding two sets of double layer ultrafiltration construction, replacing the original three sets of secondary RO with two sets of primary RO, and introducing high-quality raw water sources, it has achieved an in-situ increase of 25% and effluent conductivity of less than 150 μ S/cm. Among them, reverse osmosis uses domestically produced membranes to partially replace imported membranes. It is recommended to try to apply various new

基金项目: 青岛西海岸新区科技专项(2020-25); 山东省技术创新项目(202360200128、2024537020000098); 青岛市企业技术创新重点项目计划(LX202305.0627、LX202306.0554)

通信作者: 王金龙 E-mail: wjwjl@163.com

products, including domestic membranes in the production process of multiple systems, and verify technical and economic indicators in practice to accumulate data for subsequent membrane replacement and achieve maximum user benefits. In terms of design, for the double membrane process of sewage sources, the short process is feasible, but attention should be paid to the accuracy of design temperature, yield coefficient and raw water quality, and a certain margin should be left in the reverse osmosis design.

Key words: reclaimed water; desalination; ultrafiltration (UF); reverse osmosis(RO); expansion; membrane replacement

海水淡化是获取淡水的重要途径,但仅限于无其他淡水来源供给时最为有效。同为脱盐水获取,中水脱盐回用比海水淡化更经济、更有效。以污水处理厂达标出水为原水,通过双膜工艺制备脱盐水回用于工业,既可经济地获取淡水资源,又可实现污水的高质量回用,一举两得^[1-2]。基于某已运行约7年的脱盐中水厂的提量提标改造生产实践,分析了进口膜的可替代性,对污水源双膜工艺设计运行经验进行了总结,可为相关工程建设提供参考。

1 项目背景

1.1 项目概况

该脱盐中水厂设计产水规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,以污水处理厂一级A达标出水为原水,生产脱盐供水

给周边化工园区工业企业,要求产水电导率 $<200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。该厂以双膜工艺为核心,采用短流程布置方式(见图1)。2023年原水水质见表1。自2017年4月投产以来,经历过一次改造^[3-4],已基本满负荷运行近7年。由于园区用户用水量增加,已有处理规模不能满足要求,面临扩容改造,同时需进一步降低产水电导率,即提量同时提标。



图1 产水流程

Fig.1 Water production process diagram

表1 2023年原水水质

Tab.1 Raw water quality in 2023

| 项目 | pH | 电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) | COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Al^{3+} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 总碱度(以 CaCO_3 计)($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | 总硬度(以 CaCO_3 计)($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Fe/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Mg^{2+} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | Ca^{2+} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) |
|----|-----------------|--|---|--|---|--|--|--|---|---|
| 数值 | 7.28 ± 0.17 | $3\ 031 \pm 673$ | 23.48 ± 6.64 | 0.19 ± 0.05 | 0.60 ± 0.32 | 103.51 ± 15.03 | 648.85 ± 120.55 | 0.24 ± 0.15 | 50.85 ± 4.53 | 115.90 ± 46.05 |

1.2 系统运行情况

反渗透系统采用5组产水量为 $181.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的膜组,每组39支压力容器,排列比26:13,每个压力容器内装有7支反渗透膜,5组共计1365支膜,运行压力为1.5~2.5 MPa,脱盐率 $\geq 98\%$,回收率为72%。二级反渗透采用3组产水量为 $165 \text{ m}^3/\text{h}$ 的膜组,每组16支压力容器,排列比11:5,所有压力容器安装在一个机架上;每个压力容器内装有7支卷式复合反渗透膜,3组共计336支膜;二级反渗透系统回收率设计为85%,系统脱盐率 $\geq 96\%$,单支膜的脱盐率 $>99.5\%$ 。原设计进水电导率为 $11\ 200 \mu\text{S}/\text{cm}$,出水电导率要求 $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下,脱盐率需达到98.2%。因单级反渗透难以稳定达标,故设计了两级反渗透。在实际运行中,最不利进水电导率为 $6\ 000$

$\mu\text{S}/\text{cm}$,脱盐率需达到96.6%,单级反渗透可以满足要求,因此开始并未运行二级反渗透。

该项目投产前3年,冬季最大产水规模仅能达到设计值的80%。分析原因,主要包括超滤及反渗透设计膜通量取值偏大、未充分考虑污水源超滤清洗反洗较预期频繁、反渗透杀菌频率高于预期等。后来通过强化预处理、强化控菌、增加2组超滤系统,将原有3组二级RO中的2组改为一级RO等方式,使系统能够达到满负荷运行。

运行至6.5年,超滤与反渗透性能变化如表2所示。超滤进水膜通量下降22.8%,进水压力已逼近设备允许上限值,单组超滤平均产水量为 $140 \text{ m}^3/\text{h}$,较设计值 $198 \text{ m}^3/\text{h}$ 降低29.3%,之后通过补充2组超滤仅能满足 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 总产水量需求。由于场地

受限,超滤只能在已有超滤系统上方架二层布设。反渗透标准化膜通量降低29%,虽通过加压方式能够满足产水量要求,但基本达到极限,且运行能耗高。进水95%保证率电导率为4 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$,外供水

要求电导率 $<200 \mu\text{S}/\text{cm}$,考虑出水调整pH,则反渗透产水要求电导率 $<150 \mu\text{S}/\text{cm}$,对应最低脱盐率为96%。目前反渗透脱盐率已降至96%,保障客户供水水质的压力极大。

表2 超滤反渗透膜性能变化

Tab.2 Performance changes of ultrafiltration and reverse osmosis membranes

| 膜类型 | 参数 | 投产时参数值 | 现况(7年)参数值 | 备注 |
|---------------------|--|-----------|-----------|----------|
| 超滤(UNA-620A) | 进水膜通量/($\text{L}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$) | 57.9 | 44.7 | 下降22.8% |
| | 进水压力/kPa | 160 | 230 | 膜允许最大250 |
| | 平均EFM周期/h | 32 | 20 | |
| 反渗透(BW30XFR-400/34) | 脱盐率/% | ≥ 98 | ≥ 96 | |
| | 标准化膜通量/($\text{L}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1}$) | 77.31 | 54.7 | 下降29% |

1.3 改造面临的问题

改造目标包括增加产水规模5 000 m^3/d ,总设计产水规模达到 $2.5\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$;新增用户对产水要求高,产水电导率 $<150 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。改造面临的问题包括:

① 占地受限。厂区周边土地均有明确规划用途,无法向外扩建;厂内本就用地紧缺,故设计时采用短流程工艺以节约土地,厂内也没有扩建用地;所有提量措施均只能在已有构筑物、车间内实施。

② 脱盐要求和供水保障率要求高。产水电导率 $<150 \mu\text{S}/\text{cm}$,考虑出水调整pH,则反渗透产水要求电导率 $<100 \mu\text{S}/\text{cm}$,控制要求较高^[5];按目前进水水质,需脱盐率 $>97.6\%$;客户为大型企业和民生企业,要求供水安全可靠,否则会降低用水量或另外寻求安全可靠水源,本次提量应给予最大保证。

③ 膜老化问题。系统已运行近7年,膜性能严重下降,需通过膜更换提升产水能力;同时,反渗透膜老化,脱盐性能降低,也是换膜的重要原因。

④ 原水问题。系统增加产水规模5 000 m^3/d ,对应进水增加8 333 m^3/d ,较现况 $3.84\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 增加21.7%;前端污水处理厂一期冬季水量偏低,经常在 $4\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 以下,过年期间个别几日降至 $1\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,需引入污水处理厂二期出水;二期出水电导率为6 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较一期出水高2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上,增加了达标难度。

针对以上问题,拟采用更换膜组提高产水量和脱盐率、开辟新水源降低来水电导率等方法实现提量提标。

2 提量工程设计

2.1 原水水源

前端污水处理厂已在厂区内完成扩建,新建了

$2\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 集约型BFM系统,占地仅4 300 m^2 ,出水优于地表水准IV类标准。BFM系统出水电导率比一期低500~1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$,通过引入该项目出水,电导率预期可降至3 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下,满足脱盐率 $\geq 97\%$ 即可。该项目提量后设计原水水量为46 500 m^3/d ,以BFM出水和污水处理厂一期出水为主要水源,设计进水电导率为3 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

2.2 高效沉淀池

高效沉淀池原设计投加石灰去除暂时硬度。设计硬度调研值为380~550 mg/L (以 CaCO_3 计),设计值取400 mg/L 。实际运行时,进水暂时硬度仅约100 mg/L ,后来逐步取消石灰投加,系统运行未受到影响,故不再投加石灰。高效沉淀池最初设计时因考虑石灰投加,固体通量大,设计负荷仅为14.7 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,本次提升后表面负荷达到17.9 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,符合设计要求且较为安全。

2.3 超滤系统

已有超滤共计9组,8用1备,其中7组为2017年投产时开始使用(以下简称旧UF膜);为弥补当时设计不足,2019年增加了2组超滤。旧UF膜现况单组产水量为140 m^3/h 。

改造后反渗透总产水量为 $2.5\times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,反渗透系统回收率为72%,考虑反渗透自用水,按70%设计,考虑超滤存在检修等因素,综合产水系数为0.98,则超滤产水量需达到1 518 m^3/h ,增加329 m^3/h 产水能力。已有7组旧UF膜若全部更换,单组可提升60 m^3/h ,不考虑备用膜的提升,则共提升360 m^3/h 。

为降低成本,将某国产膜与原超滤膜的工程性能进行了比较。各取1组,均为新膜,运行1年后性能如表3所示。

表3 不同超滤膜性能对比

Tab.3 Comparison of performance of different ultrafiltration membranes

| 项目 | 某国产超滤膜 | 原超滤膜 |
|--|---------|---------|
| 净产水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 180 | 200 |
| 单组换膜价格/万元 | 0.65A | A |
| 寿命预期/a | 4 | 6 |
| 稳定进水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 220 | 220 |
| 产水、反洗时间/min | 30/4.33 | 30/2.17 |

该国产超滤膜净产水量较原膜低10%,主要是根据膜操作手册要求的反洗时间长所致。若占地有余量且可新增超滤膜组的情况下,可选用该国产超滤膜。但针对该项目,采用国产膜则仅能增加240 m^3/h ,不能满足提量要求。另外,若以12年为计算周期,则进口膜费用为2A,国产膜费用为1.95A,在费用相当的情况下,选择原膜寿命预期置信率高,更为安全可靠。该项目提量后超滤仍维持9组不变,8用1备。更换2017年投运的7组超滤膜,仍采用原超滤膜。

2.4 反渗透系统

已有反渗透共7组,5组为2017年投产用反渗透膜(以下简称旧RO膜),单组设计产水量为181 m^3/h ,冬季水温低于设计值,单组产水量平均为170 m^3/h 。为弥补水量不足,2019年将原有3组二级RO中的2组改为一级RO,单组设计产水量为165 m^3/h ;由于原设计为二级RO,改为一级RO后,将原二级反渗透进水管路与一级反渗透进水管连接,增加阻垢剂、还原剂加药点,管线及加药泵,对应给水泵及保安过滤器未设置,故仅按60 m^3/h 产水,共增加系统产水量120 m^3/h 。该厂连续产水能够达到设计流量要求,反渗透产水量平均为950 m^3/h 。

改造后反渗透总产水量为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,考虑系统杀菌、清洗、检修等因素,综合产水系数为0.88,则反渗透产水量需达到1 185 m^3/h ,需增加235 m^3/h 。即使全部更换旧RO膜,也仅能增加50 m^3/h ,仍不满足。考虑将原3组二级RO拆除,新建2组完整的一级RO系统,则该部分可增加240 m^3/h 。

为降低换膜成本,运行期间对比了某国产反渗透与原型号反渗透膜的工程性能。在同组系统中各拿出一支压力容器,分别采用两种膜运行1年进行性能比较,结果如表4所示。

可以看出,对比组运行1年后,不论是脱盐率还

是平均标准化膜通量没有显著性差别。以12年为计算周期,则进口膜费用为2B,国产膜费用为1.65B,国产膜比进口膜费用降低17.5%,经济效益显著。但国产膜寿命4年为预测值,面临寿命达不到预期的风险。本次换膜7组,其中4组采用原RO膜型号,另外3组采用国产膜。待国产膜完成一个生命周期确定性能后,后续根据运行数据判定。提量后,反渗透膜为7组,单组设计产水量为180 m^3/h ,满足提量后需求。

表4 不同反渗透膜性能对比

Tab.4 Comparison of performance of different reverse osmosis membranes

| 参数 | 某国产反渗透膜 (投产时/1年后) | BW30XFR-400/34 (投产时/1年后) |
|---|----------------------|-----------------------------|
| 脱盐率/% | 98.7/98.5 | 98.7/98.6 |
| 平均标准化膜通量/ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$) | 76.2/44.9 | 74.9/47.76 |
| 单组换膜价格/万元 | 0.55B | B |
| 寿命预期/a | 4 | 6 |

拆除原3组二级反渗透装置,将原3组二级反渗透装置的基础改为2组一级反渗透的基础。新增流量为253 m^3/h 、扬程为450 kPa的一级反渗透给水泵2台,新增大通量保安过滤器2台;阻垢剂加药口变更至一级反渗透给水泵出口,还原剂加药口变更至保安过滤器出口;新增流量为130 m^3/h 、扬程为700 kPa段间增压泵2台。新增2台进水ORP表,新增2台一段产水流量计、2台产水流量计,新增进水、产水、产排、浓排启动阀各2个。产水管线接到一级反渗透产水主管,浓水管接到一级反渗透浓水管,清洗等管线、阀门都对应变更替换。

3 提量改造效果

2023年9月完成改造后,入冬后运行稳定。原水水量稳定在 $4.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水平均电导率为3 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。高效沉淀池出水浊度平均为3.5 NTU,与改造前相当。超滤平稳产水量为1 580 m^3/h ,产水浊度 $<0.1 \text{ NTU}$,清洗周期内最高压差为100 kPa,SDI <3.0 。反渗透平稳产水量为1 134 m^3/h ,外供水电导率为70 $\mu\text{S}/\text{cm}$,脱盐率稳定在98.5%。外供平均水量为 $2.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最高日水量达到 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4 设计反思

该项目运行近7年,从设计、一次改造到此次提

量提标改造,诸多设计内容值得注意:

① 设计温度。温度对于膜产水量有重要影响,一旦设计温度取值出现偏差,则直接可能面临产水量不足的问题;同时也建议验收安排到冬季进行,按冬季最冷的1~3个月实际产水能力验收。

② 短流程可行性。该项目省去了砂滤、多介质过滤器等,仍可获得较优效果,故设计时可考虑简化中水源系统流程,降低运营维护难度。

③ 原水水质。原水水质对最终技术路线影响较大,该项目设计采用两级反渗透,但实际投产时进水电导率较预计值偏小近1/2,单级反渗透即可满足要求,造成了设计浪费;也可设计时预留二级反渗透位置和管道接口,实际水质确实较高时再增加,或借鉴该项目后期将二级反渗透改为一级,实现设备最大化利用。

④ 防止产率系数偏大估计。超滤采用死端过滤,按90%回收率设计,10%为自用水;但该取值仅考虑了反洗用水,未充分考虑反洗、清洗等停止产水的时间损失,会造成超滤产水量不足;建议严格按照膜性能进行产水量测算,防止估计偏大。

⑤ 反渗透设计应留有余量。长期运行后,膜在线清洗频率增加或清洗时间逐步增长,反渗透应留有10%~20%的余量,可有效防止因膜产水量降低导致的膜提前更换,在脱盐率降至要求以下再更换,经济效益最佳。

⑥ 控菌为第一要务。污水源的特点是进水微生物含量高且富含残余营养物,尤其夏季水温高,微生物快速增长;长期运行细菌容易产生抗药性,应采取多种杀菌措施和多种杀菌剂组合方式;一旦细菌污染大量发生,各种清洗措施效果甚微,还是应以预防为主。

5 结论

通过将已使用近7年的双膜更换、超滤建设双层增加2组、拆除原3组二级RO增加2组一级RO、引入优质原水水源等综合方式,在已有 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模基础上原位提升处理水量 $5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,提量率为25%,并实现产水电导率的进一步控制。改造后,达到了设计预期,提高了供水水量和水质保障率,满足了用户需求。建议多组系统生产过程中尝试包括国产膜在内多种新产品,实践中检验技术经济指

标,为后续换膜积累数据,实现用户效益最大化。设计上,对于污水源双膜工艺,短流程具备可行性,但应关注设计温度、产率系数、原水水质取值准确性,反渗透设计应有一定余量。

参考文献:

- [1] 周华,李莹,胡亮亮,等.石浦水厂二期改扩建工程的设计与运行[J].中国给水排水,2015,31(16):55-58.
ZHOU Hua, LI Ying, HU Liangliang, *et al.* Design and operation of second-phase renovation and expansion project of Shipu water treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(16): 55-58 (in Chinese).
- [2] 刘绪为,李金河,郝华,等.西宁市再生水利用一期工程设计[J].中国给水排水,2014,30(22):84-87.
LIU Xuwei, LI Jinhe, HAO Hua, *et al.* Design of first-phase project of reclaimed water reuse in Xining City [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 84-87 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 王金龙.再生水厂UF-RO双膜工艺的设计探讨及优化改进[J].中国给水排水,2020,36(24):120-125.
WANG Jinlong. Discussion and improvement on design of UF and RO process in a water reclamation plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 120-125 (in Chinese).
- [5] 姚吉,张稳妥,滕良方,等.“双膜工艺”在工业区污水处理厂再生水工程中的应用[J].中国给水排水,2019,35(20):37-41.
YAO Ji, ZHANG Wentuo, TENG Liangfang, *et al.* Application of double membrane process in reuse water project of industrial wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(20): 37-41 (in Chinese).

作者简介:王金龙(1988-),男,辽宁大连人,本科,高级工程师,主要从事脱盐与海水淡化等研究与工程运营工作。

E-mail:wyjwj@163.com

收稿日期:2023-12-25

修回日期:2024-01-10

(编辑:衣春敏)