

运行与管理

大唐华东电厂反渗透膜常见问题及解决措施

唐彦强

(大唐华东电力试验研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 反渗透装置作为电厂常见的水处理设备,在运行过程中通常伴有因微生物污染、化学结垢等问题引起的膜污染。不同类型的膜污染对反渗透系统运行压力、制水量、脱盐率等参数造成的影响不同,因此可以通过运行数据统计先进行直观判断,进一步采用物理、化学的方法对污染物成分进行分析,从而确定其主要成分。基于大唐华东电厂反渗透系统的运行管理经验,针对不同类型膜污染问题,通过增设预处理、优化运行条件以及膜清洗等方式降低膜污染带来的影响,从而提高反渗透系统的运行效率。

关键词: 电厂; 反渗透; 膜污染; 膜清洗

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)24-0108-07

Common Problems and Solutions to Reverse Osmosis in Datang East China Power Plant

TANG Yan-qiang

(Datang East China Electric Power Test & Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: As a common water treatment equipment in power plant, membrane fouling by microbial contamination or scale formation always occurs during operation of reverse osmosis device. Different types of membrane fouling have different effects on operation pressure, yield of water, desalination rate, etc. So operating data could be used to judge types of membrane fouling directly, and pollutant composition could be analyzed via physical and chemical method. Adding pretreatment, optimizing operating conditions and membrane cleaning were valid ways to decrease membrane fouling and increase device operation efficiency.

Key words: power plant; reverse osmosis; membrane fouling; membrane cleaning

近年来,反渗透技术广泛应用于电厂除盐水制备过程。反渗透装置以膜两侧之间压力差为推动力,只有溶剂透过膜以此实现溶剂与溶质分离。反渗透装置运行过程不涉及相变且操作简单,在海水苦咸水淡化、超纯水制备等方面发挥着重要作用^[1]。电厂反渗透装置脱盐率通常在95%以上,回收率为75%,在离子交换前增设反渗透装置,可使离子交换设备在一个运行周期内多产生5~10倍除盐水,同时大幅减少再生剂使用量及废水排放量,降

低电厂运行成本^[2]。

反渗透在运行过程中常伴有脱盐率及产水率降低、运行压力增大等现象,其根本原因是发生了不同程度的膜污染。膜污染通常是由污染物堵塞膜孔、浓差极化、滤饼压缩等引起的膜通量下降,以及其他物理和化学因素造成膜损伤导致膜性能下降等^[3]。

1 常见膜污染

微生物吸附和生长、胶体和颗粒污染物聚集以及无机物沉淀是反渗透膜污染的主要原因,在实际

运行中多由这几种因素共同作用所致^[4]。

1.1 微生物污染

微生物污染会使反渗透膜进出口压差迅速增加^[5]、膜元件产水量下降,影响反渗透膜系统的性能。原水中微生物主要包括藻类、细菌、真菌及其芽孢、孢子和病毒等^[6]。大多数微生物可以通过混凝沉淀、过滤和投加杀菌剂等方法去除,但想要完全去除来水中微生物则十分困难。反渗透运行过程中,为了提高反渗透运行效率,来水温度一般控制在 25℃,同时水中溶解性的营养物质被不断浓缩并富集在膜元件中,适宜的温度及营养物质为微生物提供了理想的生长环境,加速了微生物的新陈代谢,加快了其生长繁殖,会影响反渗透膜装置的渗透性能^[7]。微生物的生长代谢会在膜表面上形成一层生物膜,生物膜具有较强的黏性,可以保护微生物免受水流剪切作用的冲洗,生物膜也不易受化学消毒药剂的影响,因此膜元件一旦出现微生物污染并产生生物膜,就很难被彻底清洗^[8-9]。此外,未能完全去除的生物膜将引起微生物的再次快速生长。

大唐华东区域某 2×300 MW 电厂锅炉补给水处理系统原水为地表水。2 套反渗透装置采用一级两段布置方式,回收率为 75%。每套装置设计出力为 100 m³/h,两套反渗透装置基本处于连续运行状态。反渗透装置冬季运行压力增大,在线清洗后运行压力有所降低,但短时间内又迅速增大。

反渗透装置运行压差的变化见图 1。可以看出:①运行压差增大主要表现在一段反渗透膜上,二段基本保持不变;②清洗后一段反渗透膜压差明显降低,运行一段时间后一段反渗透膜压差又迅速增大;③化学清洗对二段反渗透膜压差无明显作用。

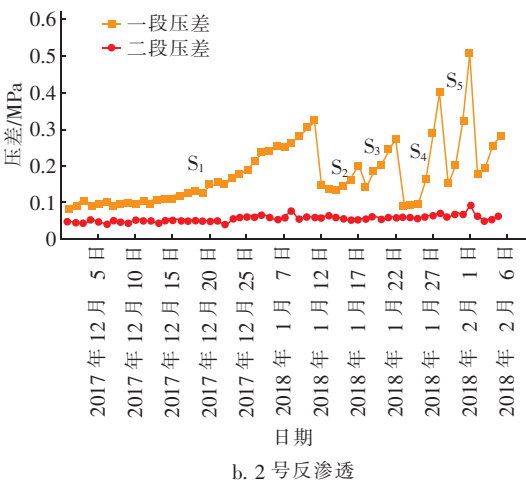
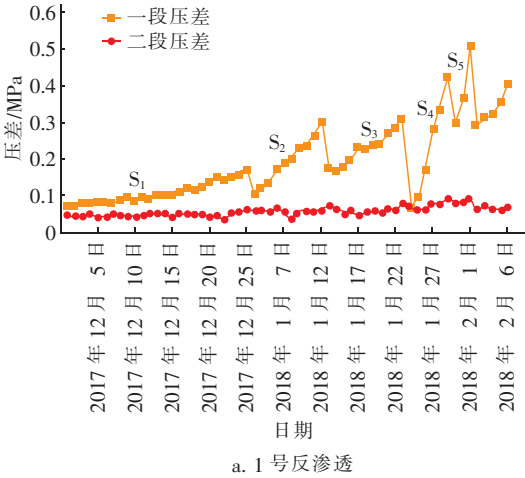


图 1 反渗透装置的压差变化

Fig.1 Pressure drop of RO devices

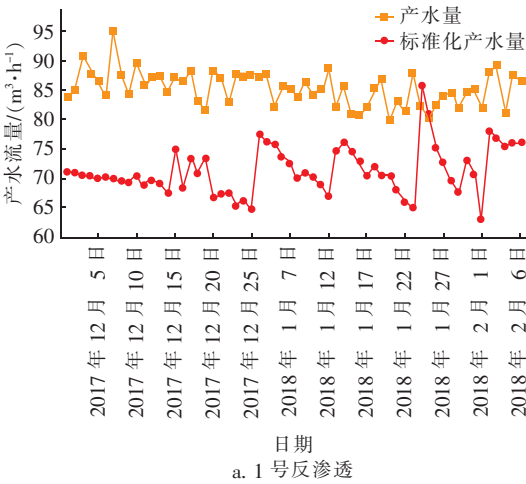
从图 1 可以看出,短时间内一段反渗透膜压差与时间的关系接近线性变化,分别对 1 号、2 号反渗透膜一段压差随时间变化进行线性拟合,结果见表 1,斜率 k 为压力变化速度。计算后可以发现, k 值越来越大,表明压力变化速率越来越快,膜污染速率也越快。

表 1 反渗透运行压力拟合结果

Tab.1 Fitting results of operating pressure for RO devices

| 阶段 | 1 号 | | 2 号 | |
|----|---------|---------|---------|---------|
| | k | R^2 | k | R^2 |
| S1 | 0.003 9 | 0.920 7 | 0.005 3 | 0.937 3 |
| S2 | 0.021 1 | 0.986 8 | 0.010 3 | 0.578 5 |
| S3 | 0.013 9 | 0.948 1 | 0.033 0 | 0.979 7 |
| S4 | 0.073 2 | 0.979 3 | 0.063 6 | 0.844 2 |
| S5 | 0.104 2 | 0.975 3 | 0.119 3 | 0.931 1 |

图 2 为反渗透装置的产水量及标准化产水量情况。



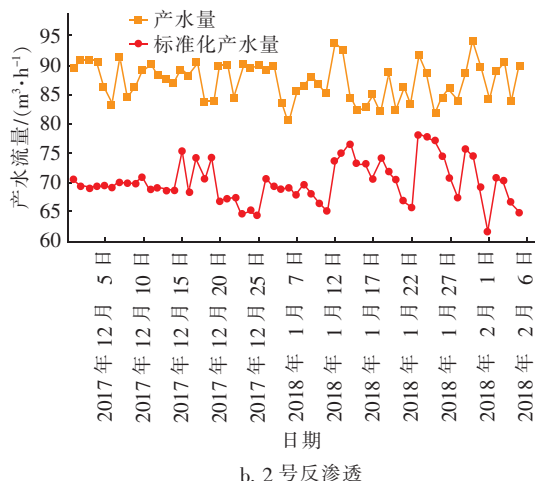


图2 反渗透产水量及标准化产水量变化

Fig. 2 Water yield and standardized water yield of RO devices

系统为了维持稳定的产水量,不断提高反渗透装置入口压力,1、2号反渗透产水量基本维持在 $80 \sim 95 \text{ m}^3/\text{h}$ 。对反渗透产水量进行标准化计算^[10],可以看出系统标准化产水量远低于产水量,系统每次清洗后标准化产水量增大,但随后又逐渐降低。可见,反渗透膜系统标准化产水量能准确地反映出反渗透膜性能情况^[11]。

由于反渗透系统需在线连续清洗,因此在化学清洗完成后,拆除保安过滤器滤芯,发现保安过滤器内壁上粘有少量的生物黏泥,且具有腥臭味。可见化学清洗后仍有少量的微生物附着于系统内,在适宜的条件下微生物将大量繁殖,再次造成膜污染。表2为反渗透来水TOC情况,

表2 反渗透来水TOC

Tab. 2 Influent TOC of RO $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 位置 | TOC |
|-----------|-------|
| 机械加速澄清池出口 | 6.518 |
| 滤池出口 | 4.132 |
| 超滤进口 | 4.098 |
| 超滤出口 | 4.659 |
| 反渗透进口 | 3.973 |
| 反渗透出口 | 1.182 |

图3为反渗透来水温度变化情况。2018年1月7日前来水水温处于较低水平,之后温度升高,1月17日后稳定在 22°C 。反渗透运行温度的增加有利于提高设备的运行效率,原因是水温升高,使得透过膜的水分子黏度下降、扩散性能增强,进而提高产水量^[12-13]。但通过表1及图3的比较可以发现,运

行温度的提高反而使膜污染速率增大,影响了设备的运行。其原因是反渗透设备已经受到微生物污染时,化学清洗无法完全去除微生物的影响,且来水中含有大量有机物,温度的提升有利于微生物的繁殖,进而加剧了反渗透膜的污染^[14]。

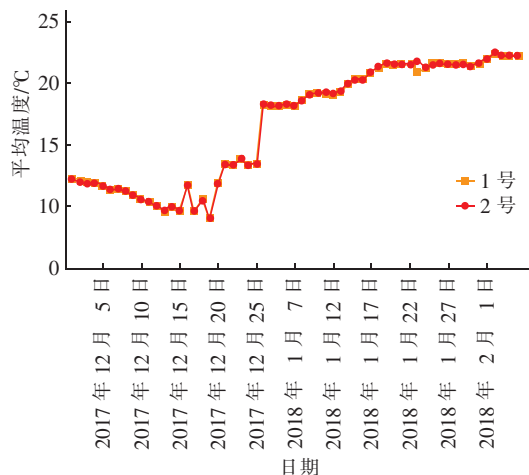


图3 反渗透来水水温变化

Fig. 3 Influent temperature of RO

通过反渗透装置运行参数的变化可以看出,反渗透装置发生了较为严重的微生物污染,且主要发生在一段;化学清洗虽可有效去除微生物,降低运行压力,提高标准化产水量,但无法彻底去除微生物,且来水TOC较高,水温适宜微生物生长,导致清洗后短时间内再次发生微生物污染。

1.2 化学结垢

来水中的难溶盐在膜元件内被浓缩,当超过其溶度积时,就会沉淀在反渗透膜表面上,这种现象通常称之为“结垢”。浓差极化是导致反渗透膜发生结垢问题的主要原因,反渗透运行过程中,靠近膜表面区域会形成一层边界层,边界层中的水通过膜进入另一侧,而离子被截留,导致边界层中盐浓度升高,当成垢盐的浓度超过其饱和浓度时就会发生结垢^[15]。化学结垢的原因通常是由于操作不当引起的,例如阻垢剂加药量偏低、阻垢剂更换等^[4]。

大唐华东区域某 $2 \times 660 \text{ MW}$ 电厂锅炉补给水处理系统原水为地表水。2套反渗透装置,采用一级两段布置方式,回收率为75%。每套装置设计出力为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,反渗透系统添加亚硫酸氢钠和阻垢剂。电厂由于对外供热,两套反渗透装置基本处于连续运行状态。反渗透膜运行多年后出现运行压差增大、制水量降低、脱盐率下降等问题。运行压差、

制水量、脱盐率变化见图4。

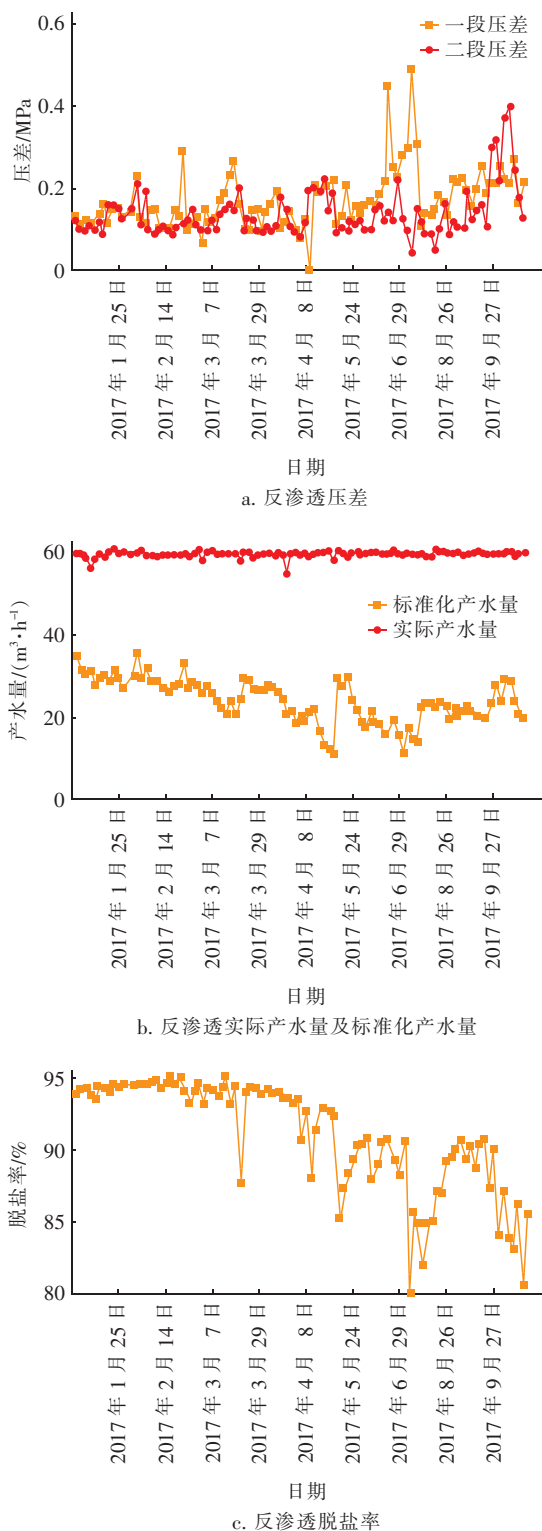


图4 反渗透系统运行压力、制水量和脱盐率的变化

Fig.4 Performance of RO including pressure drop, water yield and desalination rate

与图1中反渗透运行压差变化不同,该厂反渗

透一段压差和二段压差均有明显变化,表明系统一段、二段均发生了不同程度的污染。

将反渗透膜表面污染物取下,向其中加入浓盐酸处理,污染物溶解较慢,且溶解过程中没有明显气泡产生。进一步测定污染物中有机物,105℃灼烧质量为0.5186g,600℃灼烧质量为0.4154g。

通过灼烧数据可计算出,污染物的有机物比例为19.89%,无机物比例为80.11%,可见污染物主要为无机物。对600℃灼烧后的残渣进行X射线荧光光谱分析,XRF测试结果表明,灼烧后产物主要由Ca(CaO为33.42%)、C(CO₂为24.09%)、P(P₂O₅为40.39%)元素组成。通过XRF检测,可以确定膜表面污染物的无机物主要成分为磷酸盐,同时含有少量的碳酸盐,这与污染物中加入盐酸后无明显气泡结果一致。

1.3 胶体及颗粒物污染

胶体和颗粒物污染会严重影响反渗透膜元件的性能,减少淡水产量,有时还会降低脱盐率。胶体污染的主要原因是原水中的SiO₂水解产生硅酸,硅酸在水中溶解度很小,且无法通过前端过滤处理脱除;其次,原水pH值变化及金属离子的浓缩,都有可能造成金属氢氧化物沉积造成污垢^[15]。颗粒物污染主要是反渗透前端保安过滤器出现问题,导致污染物进入系统,颗粒物污染不仅仅造成反渗透膜的性能下降,还有可能刮伤反渗透膜,造成不可逆的物理损伤。

确定反渗透膜元件进水胶体和颗粒浓度的通用办法是测量水中的淤泥密度指数(SDI),它是检测反渗透预处理系统运行情况的重要指标之一,一般要求反渗透进水SDI值<4。

2 反渗透膜污染防治

膜污染导致反渗透产水量下降、产水电导率不合格等一系列问题,为了保证锅炉补给水系统的稳定运行,需要尽可能降低膜污染带来的不利影响,以提高整个制水系统的运行效率。通常可以从预处理、操作条件及膜清洗等方面减轻膜污染。

2.1 增设预处理

锅炉补给水水源通常为地表水,有些电厂也会使用城市中水。水中颗粒物、有机物、微生物及其他杂质对反渗透设备的稳定运行具有明显的影响。预处理需保证全系统可以安全连续运行,例如混凝沉淀设计不合理或操作失误,会导致后续过滤设备超

负荷运行,不合理的预处理会导致膜频繁清洗,进而引起清洗费用的增加、停机时间的延长甚至对膜造成不可逆的损伤。反渗透常见的预处理方式有混凝沉淀、滤池过滤、超滤、投加药剂等^[16-18],见表 3。

表 3 常见预处理手段

Tab. 3 Common pretreatment methods

| 污染物 | 预处理手段 |
|-------------------------------------------|----------------------------------|
| 难溶盐(CaSO_4 、 CaCO_3 等) | 强酸阳树脂软化、弱酸阳树脂脱硬度、石灰软化、加酸、加阻垢剂 |
| 胶体和颗粒物 | 介质过滤、氧化-过滤、在线过滤、絮凝沉淀、微滤或超滤、滤芯式过滤 |
| 微生物污染 | 氯杀菌、亚硫酸氢钠冲击式杀菌 |

实际应用中需要根据原水组成和应用条件选择合适的预处理方案。绝大多数电厂补给水水源为地表水,多采用混凝沉淀/滤池过滤/超滤进行预处理,通过加酸、加阻垢剂防止结垢,投加杀菌剂防止发生微生物污染,这种预处理方式所需设备、场地、药剂较少,且运行简单,可以保证反渗透进水水质达标;若采用中水作为水源,通常需要增加软化设备,以降低来水中难溶盐离子浓度,降低反渗透设备的结垢风险。

2.2 优化操作条件

反渗透膜性能根据膜厂家制造工艺以及材料而有所不同,因此厂商对膜的操作条件都有严格要求。在膜的实际应用过程中,合理地调整运行参数有利于减缓膜污染。例如反渗透发生结垢时,当其他结垢控制措施无法起作用时,可以通过调整系统的运行参数防止结垢问题的加剧,降低系统回收率来降低离子浓度,保证浓水中难溶盐浓度低于溶度积,从而不会出现沉淀;也可以调节水温 and pH 值,提高难溶盐的溶解度,降低发生沉淀的风险。

合理调整运行参数须建立在掌握膜性能变化的基础上。电厂在实际运行过程中,为了保证除盐水的制备,反渗透设备通常以 75% 的回收率运行,且进水通过变频泵自动控制。当反渗透膜发生污染后,为了保证回收率,往往会提高运行压力,这样的做法会进一步加重膜污染。因此需要对反渗透膜数据进行标准化,掌握了膜性能的变化后再对运行参数进行调整。

2.3 膜清洗

在反渗透设备日常运行过程中,优化操作条件和增设预处理装置只能降低膜污染速率,但仍会有污染物沉积在膜表面,污染物累积到一定程度后需

要进行膜清洗。膜清洗能够有效降低膜污染情况,但频繁的清洗会导致膜发生不同程度的劣化,同时也增加系统腐蚀的可能性。因此,需要对膜性能进行评价后再进行清洗。通常对反渗透膜运行数据进行标准化计算,当出现标准化产水量降低 10% 以上;进水和浓水之间的标准化压差上升了 15% 或标准化透盐率增加 5% 以上,需要进行膜清洗。通常有两种方法:在线清洗和离线清洗^[4],二者都是通过化学药剂对膜进行清洗。首先以低流量向反渗透膜输入清洗液,以尽可能低的清洗液压力置换原反渗透膜内的水,压力须低到不会产生明显的渗透产水,低压置换操作可以最大限度地降低污垢再次沉淀到膜表面;当膜内的水被置换之后,浓水管路中出现清洗液,让清洗液循环回清洗水箱,循环过程中保持清洗液温度恒定;循环清洗完成后,让膜元件完全浸泡在清洗液中,浸泡时间根据污染情况进行调整,可以通过很低的循环流量保证浸泡过程中的温度;随后高流量水泵循环,高流量能冲洗掉被清洗液清洗下来的污染物;最后使用清水将反渗透膜内的清洗液冲洗干净,完成膜清洗。表 4 为常见的清洗药剂^[19]。

表 4 常见清洗药剂

Tab. 4 Common cleaning agents

| 污染物 | 清洗药剂 |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 无机盐垢 (如 CaCO_3) | 最好采用 0.2% HCl,也可用 1.0% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (连二亚硫酸钠)、0.5% H_3PO_4 或 2.0% 柠檬酸 |
| 硫酸盐垢 (如 CaSO_4 、 BaSO_4) | 最好采用 0.1% NaOH 或 1.0% Na_4EDTA ,也可用 0.025% Na-SDS |
| 金属氧化物 (如铁) | 最好采用 1.0% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (连二亚硫酸钠),也可用 0.5% H_3PO_4 、1.0% $\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$ (氨基磺酸)或 2.0% 柠檬酸 |
| 无机胶体 (淤泥) | 最好采用 0.1% NaOH 或 1.0% Na_4EDTA |
| 硅 | 最好采用 0.1% NaOH 或 0.025% Na-SDS,也可用 1.0% Na_4EDTA |
| 微生物膜 | 最好采用 0.1% NaOH 或 0.025% Na-SDS,也可用 1.0% Na_4EDTA |
| 有机物 | 第一步清洗采用 0.1% NaOH、0.025% Na-SDS 或 1.0% Na_4EDTA ,第二步清洗采用 0.2% HCl |

在线清洗和离线清洗步骤基本相同,但在线清洗操作方便,膜元件可直接通过反渗透系统完成清洗,缺点是在线清洗受到运行设备条件的限制,膜元

件数量较多导致清洗不够彻底,同时在线清洗所用药剂多为 HCl 和 NaOH,清洗效果有限,因此在线清洗适用于污染较轻的情况。而离线清洗是将膜元件从运行系统中拆下,根据污染物特点选择清洗药剂,并采用专门的清洗装置对单个膜进行清洗^[20]。离线清洗可以反复、交替进行,清洗效果优于在线清洗,适用于污染较为严重的反渗透膜。

3 结语

① 微生物吸附和生长、无机物沉淀引起的膜污染,对反渗透膜影响不同,具体表现在反渗透膜系统一、二段压差变化上,微生物引起的膜污染主要发生在一段反渗透,导致一段压差的迅速增大,而无机物沉淀在一、二段反渗透膜上都有发生。因此,可以通过运行参数的变化,对反渗透膜污染类型进行初步判断,后续可对污染物进行化学分析,确定其污染类型。

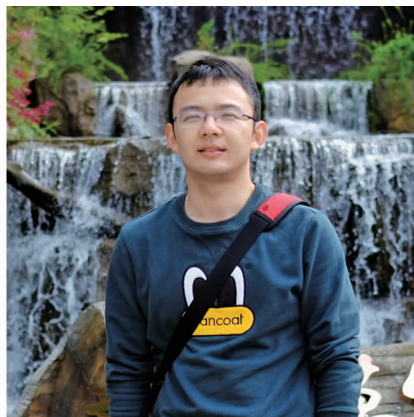
② 反渗透系统运行过程中,系统产水量并不能反映反渗透膜系统性能变化及膜污染情况。通过标准化计算,可以得到反渗透膜实际性能的变化,从而采取相应措施。

③ 适当地提高来水温度能够提高反渗透膜系统的产水量,但对于已经发生微生物污染的反渗透膜系统,由于微生物难以被完全去除,提高水温可能加剧膜污染程度。

参考文献:

- [1] 张雨山,魏杨杨,曹震,等. 反渗透膜的研究进展与展望[J]. 化学工业与工程,2015,32(5):8-19.
Zhang Yushan, Wei Yangyang, Cao Zhen, *et al.* Progress and prospect in the development of reverse osmosis membrane technology [J]. Chemical Industry and Engineering, 2015, 32(5): 8-19 (in Chinese).
- [2] 刘小平,傅晓萍,李本高. 除盐水制备技术进展[J]. 工业水处理,2008,28(4):6-9.
Liu Xiaoping, Fu Xiaoping, Li Bengao. Progress in the preparation of the desalination water technology [J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(4): 6-9 (in Chinese).
- [3] 侯钰,桑军强,李本高. 反渗透膜污染成因与防治[J]. 工业用水与废水,2008,39(1):23-26.
Hou Yu, Sang Junqiang, Li Bengao. Cause of reverse osmosis membrane fouling and its prevention and cure [J]. Industrial Water & Wastewater, 2008, 39(1): 23-26 (in Chinese).
- [4] 赖冰冰,齐麟,杨晓伟. 反渗透膜清洗技术及研究进展[J]. 清洗世界,2014,30(6):1-5.
Lai Bingbing, Qi Lin, Yang Xiaowei. Reverse osmosis membrane cleaning technology and research progress [J]. Cleaning World, 2014, 30(6): 1-5 (in Chinese).
- [5] 李福勤,杨久坡,谷宏旺,等. 深度处理污染河水的反渗透膜污染特性与防治[J]. 中国给水排水,2006,22(20):90-92.
Li Fuqin, Yang Jiupo, Gu Hongwang, *et al.* Fouling characteristics and prevention of RO membrane for advanced treatment of polluted river water [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(20): 90-92 (in Chinese).
- [6] 曹连城. 反渗透水处理系统微生物污染特性分析及对策[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2002,25(3):252-254.
Cao Liancheng. Pollution of microorganism of reverse osmosis film and its prevention [J]. Journal of Wuhan University of Science & Technology: Nature Science Edition, 2002, 25(3): 252-254 (in Chinese).
- [7] 苏立永,潘献辉,葛云红,等. 非氧化杀菌剂控制反渗透系统生物污染[J]. 中国给水排水,2012,28(20):17-19.
Su Liyong, Pan Xianhui, Ge Yunhong, *et al.* Non-oxidative biocide for control of biofouling in RO systems [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(20): 17-19 (in Chinese).
- [8] 郑猛,吴青芸,周浩媛,等. 海水淡化反渗透膜微生物污染及防控研究进展[J]. 膜科学与技术,2015,35(1):123-130.
Zheng Meng, Wu Qingyun, Zhou Haoyuan, *et al.* Research progress of reverse osmosis membrane biofouling and its prevention strategy for desalination application [J]. Membrane Science and Technology, 2015, 35(1): 123-130 (in Chinese).
- [9] 李进,张葆宗. 反渗透水处理系统微生物污染特性分析及对策[J]. 工业水处理,2000,20(5):10-12.
Li Jin, Zhang Baozong. Pollution and prevention of microorganism on reverse osmosis film [J]. Industrial Water Treatment, 2000, 20(5): 10-12 (in Chinese).
- [10] 陈玉坤,苑宏英,靖大为. 反渗透膜元件测试指标的标准化[J]. 工业水处理,2017,37(8):30-33.
Chen Yukun, Yuan Hongying, Jing Dawei. Standardization of RO membrane elements testing

- indicators [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37 (8): 30–33 (in Chinese).
- [11] 田华, 刘泊强. 反渗透膜系统性能标准化在化学清洗中的应用[J]. *清洗世界*, 2019, 35(1): 20–21.
Tian Hua, Liu Boqiang. Application of standardization of reverse osmosis membrane system performance in chemical cleaning [J]. *Cleaning World*, 2019, 35(1): 20–21 (in Chinese).
- [12] 陈乾荣, 何驹, 娄伦武, 等. 水温对反渗透装置运行的影响及对策措施[J]. *氮肥技术*, 2015, 36(1): 22–23.
Chen Qianrong, He Ju, Lou Lunwu, *et al.* Effect of water temperature on reverse osmosis unit and countermeasures [J]. *Nitrogenous Fertilizer Technology*, 2015, 36(1): 22–23 (in Chinese).
- [13] 罗浩, 江海, 靖大为. 反渗透系统中产水通量的温度特性分析[J]. *天津城市建设学院学报*, 2006(4): 270–272.
Luo Hao, Jiang Hai, Jing Dawei. Analysis of water yield flux temperature properties in reverse osmosis system [J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2006(4): 270–272 (in Chinese).
- [14] 冯礼奎, 李广辉, 葛雪静, 等. 反渗透预处理系统微生物污染原因分析及处理[J]. *工业水处理*, 2016, 36(3): 103–105.
Feng Likui, Li Guanghui, Ge Xuejing, *et al.* Cause analysis and treatment of microorganism pollution in the pretreatment system of reverse osmosis [J]. *Industrial Water Treatment*, 2016, 36(3): 103–105 (in Chinese).
- [15] 杨昆, 王宇彤. 反渗透系统的结垢污染与清洗维护[J]. *膜科学与技术*, 2001, 21(4): 61–64.
Yang Kun, Wang Yutong. Scaling fouling of RO systems and cleaning maintenance [J]. *Membrane Science and Technology*, 2001, 21(4): 61–64 (in Chinese).
- [16] 陈侠, 詹志斌, 陈丽芳, 等. 纳滤作为反渗透海水淡化预处理的研究[J]. *膜科学与技术*, 2013, 33(5): 59–62.
Chen Xia, Zhan Zhibin, Chen Lifang, *et al.* Research on nanofiltration pretreatment of reverse-osmosis sea water desalination [J]. *Membrane Science and Technology*, 2013, 33(5): 59–62 (in Chinese).
- [17] 徐佳, 苏保卫, 高忠文, 等. 超滤用于海水淡化预处理的研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2007, 27(1): 73–78.
Xu Jia, Su Baowei, Gao Zhongwen, *et al.* Recent development of UF as pretreatment for SWRO desalination [J]. *Membrane Science and Technology*, 2007, 27(1): 73–78 (in Chinese).
- [18] 李进, 许兆义, 于海琴. 微滤/反渗透处理、回用循环冷却排水[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(9): 47–49.
Li Jin, Xu Zhaoyi, Yu Haiqin. Microfiltration (MF)/reverse osmosis (RO) process for treatment and reuse of recirculating cool water [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(9): 47–49 (in Chinese).
- [19] 安娜, 姬朝青, 许振良. 电厂反渗透系统膜污染防治与膜清洗的研究[J]. *净水技术*, 2009, 28(3): 23–26.
An Na, Ji Chaoqing, Xu Zhenliang. Study on membrane fouling prevention and membrane cleaning of power plant reverse osmosis system [J]. *Water Purification Technology*, 2009, 28(3): 23–26 (in Chinese).
- [20] 王磊, 王峰, 胡志强, 等. 反渗透膜离线清洗影响因素[J]. *工业水处理*, 2013, 33(3): 90–92.
Wang Lei, Wang Feng, Hu Zhiqiang, *et al.* Influencing factors of reverse osmosis membranes off-line cleaning [J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, 33(3): 90–92 (in Chinese).



作者简介: 唐彦强 (1991 –), 男, 安徽六安人, 硕士, 助理工程师, 主要从事电厂水务、废水零排放等工作。

E-mail: tyq828@163.com

收稿日期: 2019-05-29