

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.24.022

# 再生水厂 UF-RO 双膜工艺的设计探讨及优化改进

王金龙

(青岛锦龙弘业环保有限公司, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 某再生水厂以污水处理厂出水为原水,采用超滤(UF)-反渗透(RO)“双膜”工艺,冬季最大净产水规模仅能达到设计值的80%。通过对设计参数与运行参数的对比研究发现,超滤及反渗透系统设计时,膜通量取值偏大,导致冬季实际产水量不足;同时,未充分考虑污水厂出水成分复杂、细菌含量高等特点,超滤未设计前处理防护工艺,超滤清洗、反洗周期取值偏高,反渗透杀菌频率取值偏低,导致系统自用水量增加;系统设计预留不足,未考虑反渗透离线清洗及设备维修的膜组备用。后续改造时,增加了超滤前的多介质过滤器,强化超滤预处理;同时增加高效池出水口、超滤产水池次氯酸钠投药点,强化反渗透控菌;增加2组超滤系统、1组反渗透系统,确保系统满负荷运行。建议类似项目在冬季进行中试,采用最不利水温时的膜通量,并充分考虑自用水量的损耗,同时应参考《城镇污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2016)的推荐值。

**关键词:** 再生水; 超滤; 反渗透; 反洗; 膜通量

**中图分类号:** TU992      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1000-4602(2020)24-0120-06

## Discussion and Improvement on Design of UF and RO Process in a Water Reclamation Plant

WANG Jin-long

(Qingdao Jinlong Hongye Environmental Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract:** A water reclamation plant uses the ultrafiltration (UF) and reverse osmosis (RO) membrane process to treat the effluent of a sewage plant, and can only reach 80% of the designed treatment capacity in winter. Through the comparative study of design parameters and operation parameters, it was found that the designed membrane flux value of UF and RO was too large, resulting in insufficient winter water production. At the same time, since the effluent characteristics of the sewage plant such as complex components and many bacteria are not fully considered, the pretreatment and protection technology of UF is not designed. Since the UF cleaning backwash cycle is high and the RO sterilization frequency is low, the system water consumption is increased. Besides, there's insufficient system design reservation and no standby membrane set for RO offline cleaning and equipment maintenance. In the following reconstruction, multi-media filters before UF are added to strengthen the UF pretreatment. At the same time, the sodium hypochlorite injection points of the high-efficiency tank outlet and the UF production tank are added to strengthen the bacteria control of the RO system. Two groups of UF systems and 1 group of RO system are added to ensure that the system can reach full load operation. It is recommended that similar projects should be piloted in winter, using the membrane flux at the most unfavorable water temperature, and the loss of self-consumption water should be fully considered. At the same time, recommended values in *Code for Design of Municipal Wastewater Reclamation and Reuse* (GB 50335-2016) should be referred.

**Key words:** water reclamation; UF; RO; backwashing; membrane flux

1 工程概况

超滤(UF)-反渗透(RO)“双膜”工艺主要用于工业脱盐,以及部分给水的深度处理,现已发展数十年,技术成熟可靠。随着国家对于节水的倡导,部分地区出现了以污水为水源的“双膜”工艺应用案例<sup>[1-5]</sup>,旨在实现污水的回用,降低对于新鲜水的占用。但以污水为水源的“双膜”设计,往往照搬传统净水的双膜设计经验参数,出现了运行参数与设计参数差距较大,无法达到满负荷运行等问题。污水处理厂出水水质虽然达到一级 A 标准,但是与净水相比,水质成分仍然复杂,细菌含量较高,需充分考虑其对“双膜”工艺的影响。

青岛某污水再生利用水厂设计产水规模为  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,以某污水厂出水(一级 A 标准)为原水,采用高密度沉淀池、UF-RO“双膜”技术处理,最终出水  $\text{TDS} < 100 \text{ mg/L}$ ,实现污水深度处理后的精制回用。该项目于 2016 年设计建设,2017 年 4 月调试。全厂处理工艺分为产水线、浓水线、污泥线,各工艺段设计水温均为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,膜车间设有水源热泵以满足冬季水温要求,热泵进水流量  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,制冷、制热温差  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。水源热泵可用于办公楼冬季制热、夏季制冷;冬季膜车间制热,作为暖气使用,保证车间温度达到  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

再生水厂整体工艺流程如图 1 所示。

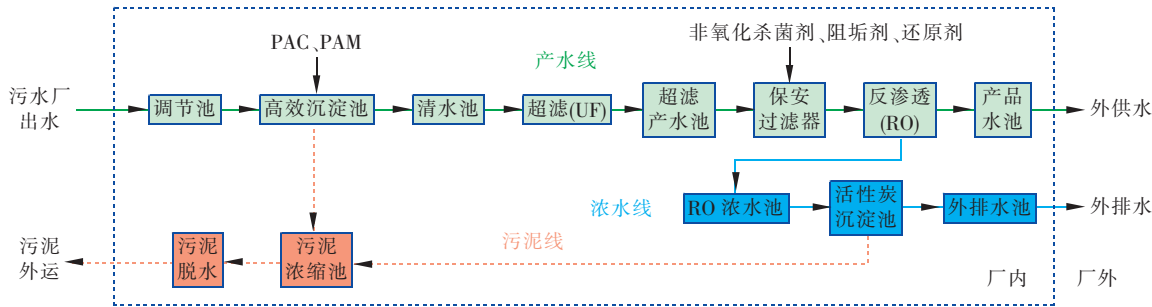


图 1 再生水厂工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of water reclamation plant

高效石灰软化沉淀池设计流量  $1\ 600 \text{ m}^3/\text{h}$ ,共 2 组,分为快速混凝区、石灰反应区、絮凝区、沉淀区。调节池投加次氯酸钠  $2 \text{ mg/L}$ ,高效沉淀池投加 PAC 为  $25 \text{ mg/L}$ 、熟石灰为  $100 \text{ mg/L}$ 、PAM 为  $0.3 \text{ mg/L}$ (阴离子)。采用压力式 UF,设计进水流量  $1\ 325 \text{ m}^3/\text{h}$ ,共 7 组,单组设计处理量  $220 \text{ m}^3/\text{h}$ ,产水量  $198 \text{ m}^3/\text{h}$ ,设计同时运行 6 组,每组 76 支膜,膜面积  $50 \text{ m}^2$ ,进水膜通量  $57.9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,设计回收率 90%。UF 分为过滤、气水反洗、维护性清洗

(EFM)、化学清洗(CIP)几种状态,EFM 和 CIP 需投加次氯酸钠、氢氧化钠、盐酸。过滤 30 min 后反洗 5~10 min;反洗达到 48 次,进行 EFM 清洗;反洗达到 1 440 次,进行 CIP 清洗;EFM 周期约 1~2 d 一次,CIP 周期约 30 d 一次。RO 设计进水流量  $1\ 260 \text{ m}^3/\text{h}$ ,膜通量  $27.26 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,浓水设计流量  $353 \text{ m}^3/\text{h}$ ,产水回收率 72%,共 5 组,单组产水  $181.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,杀菌、清洗等用水量约为产水的 5%。再生水厂实际水质如表 1 所示。

表 1 再生水厂实际水质

Tab. 1 Actual water quality of water reclamation plant

项目	电导率/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	pH 值	浊度/ NTU	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Al/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Fe/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Mg}^{2+}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
原水	$3\ 028.47 \pm 678.43$	$7.23 \pm 0.12$	$3.00 \pm 1.60$	$24.90 \pm 5.60$	$0.24 \pm 0.32$	$0.31 \pm 0.25$	$53.42 \pm 12.60$	$130.19 \pm 19.68$	$0.41 \pm 0.17$
高效沉淀池出水	$2\ 888.62 \pm 683.40$	$7.19 \pm 0.20$	$1.25 \pm 0.79$	$20.66 \pm 4.83$	$0.50 \pm 0.18$	$0.12 \pm 0.11$	$53.54 \pm 10.37$	$121.63 \pm 29.78$	$0.07 \pm 0.04$
UF 产水	$2\ 854.90 \pm 683.91$	$7.20 \pm 0.21$	$0.09 \pm 0.03$	$20.17 \pm 3.45$	$0.10 \pm 0.05$	$0.00 \pm 0.00$	$48.29 \pm 11.93$	$88.66 \pm 27.18$	$0.04 \pm 0.02$

实际进水水质满足设计条件,但再生水厂运行投产3年以来,始终达不到设计产水规模。实际运行中,冬季最大产水规模仅达到设计值的80%,原设计存在设计水量不足的问题,需分析出原因并提出相应解决措施。

## 2 设计问题分析与对策

实际运行表明,UF和RO的膜通量选值偏大是系统达不到设计产水规模的主要瓶颈。

表2 UF系统的设计值及实际运行情况

Tab. 2 Design value and actual operation situation of UF

项目	参数	设计值	夏季(>20℃)	冬季(10~15℃)	设计建议
单组基准	进水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	220	220	200	200
	分析周期/h	72	72	72	72
单组清洗	清洗周期/h	48	36	18	18
	清洗次数/次	1.5	2	4	4
	单次清洗时间/h	2	2	2.5	2.5
	清洗总时间/h	3	4	10	10
	单次清洗水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{次}^{-1}$ )	41.67	41.67	41.67	41.67
	清洗水量/ $\text{m}^3$	62.50	83.34	166.68	166.68
单组反洗	反洗周期/min	30	30	25	25
	反洗时间/min	3	3	4	5
	反洗次数/次	125.45	123.64	128.28	124.00
	反洗总时间/h	6.27	6.18	8.55	10.33
	反洗流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	290	290	290	290
	反洗进水时间/min	1	1	1.5	1.5
	反洗水量/ $\text{m}^3$	606.4	597.6	930.0	899.0
单组产水	清洗反洗时间/h	9.3	10.2	18.6	20.3
	产水时间/h	62.7	61.8	53.4	51.7
系统	组数/组	7.0	7.0	7.0	9.0
	产水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	1 341.7	1 322.2	1 039.3	1 291.7
	净产水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	1 276.6	1 256.0	932.7	1 158.5
	回收率/%	95	95	90	90
	负荷率/%	110	109	81	100

注: 反洗次数=(分析周期-清洗次数×单次清洗时间)/(反洗周期+反洗时间)×60;  
反洗水量=反洗次数×反洗流量×反洗时间/60。

UF单组设计处理量220  $\text{m}^3/\text{h}$ ,设计运行6组,备用1组。设计按照6组UF不间断地连续产水,膜组需要反洗或清洗时,启用备用膜组作为补充。6组UF运行,则单组进水量至少为214  $\text{m}^3/\text{h}$ ,而设计为220  $\text{m}^3/\text{h}$ ,名义上水量应当可达到满负荷。以单组膜72 h运行周期分析,清洗和反洗一共需要9.27 h,6组膜共需要55.62 h,低于备用膜组可运行时间(72 h),能够满足有膜反洗和清洗的补充要求,且有一定的余量。夏季运行时,基本和设计值相符。清洗周期较设计值缩短,主要是因为原水为污水厂出

## 2.1 UF设计与实际运行分析

以单组UF系统运行72 h作为分析基础,表2列举了单组UF设计、夏季(>20℃)和冬季(10~15℃)的相关参数。虽然UF设计6用1备,但为统一计算口径,UF按7组进行计算分析。该厂总设计产水量 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,反渗透回收率设计值72%,则UF产水量需达到1 157  $\text{m}^3/\text{h}$ ,若超滤回收率按90%计算,则超滤进水量需达到1 286  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

水,实际对于膜污堵影响较传统地表水源大,压差增长较净水源的UF系统快,但其影响较小,UF系统能够达到再生水厂满负荷运行对于UF产水量的要求。

冬季运行时,压差与设计值相差较大,系统压差增长速度显著高于夏季,如图2所示。一个化学清洗周期内,夏季UF压差仅从40 kPa增长至80 kPa,而冬季可从60 kPa增至接近200 kPa,几乎达到设备可承受的极限值。为保证设备安全,只能降低进水量,UF膜组进水量从设计的220  $\text{m}^3/\text{h}$ 优化为

200 m<sup>3</sup>/h,即 UF 进水膜通量由 57.9 L/(m<sup>2</sup>·h) 优化为 52.6 L/(m<sup>2</sup>·h),并且增加反洗、化学清洗频率。虽然 UF 的回收率从 95% 略降至 90%,仍在设计范围内,但是系统负荷率大幅下降,仅为设计负荷的 81%,较设计值下降约 29%。

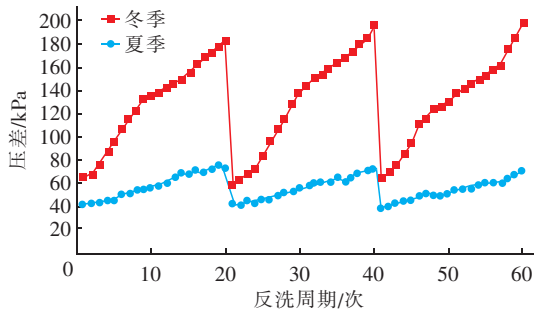


图 2 冬夏 UF 压差增长趋势

Fig. 2 UF differential pressure growth between summer and winter

本项目设计水温为 15℃,冬季为保证 UF 运行,UF 进水量降低了 9%,本质上相当于设计通量取值过高。根据实际运行反推设计,仅能满足 20℃ 以上的运行,相当于设计过程中少考虑了 5℃。温度每降低 4℃,UF、RO 的产水量对应降低约 10%,这与本项目的情况一致。

反洗频率增加,实质上降低了周期内产水时间比(产水时间:反洗时间)。图 3 分析了 UF 产水时间比对全厂负荷率的影响。

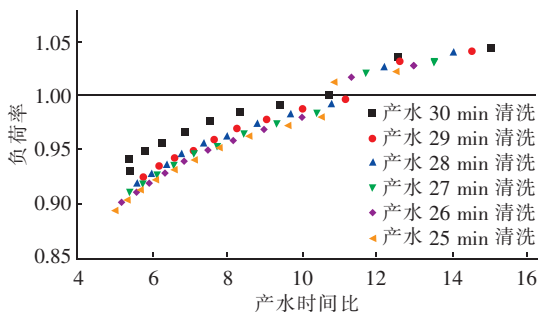


图 3 UF 产水时间比对全厂负荷率的影响

Fig. 3 Effect of UF water production time ratio on the whole plant load

由图 3 可以看出,只有 7 组全部运行,且产水时间比 > 11 时,系统才能达到满负荷运行。设计时仅考虑预留 1 组,并不能满足进水水质出现冲击或进水压力增大导致压差增长过快的情形。压差增长过快,为了保证系统安全,只能降低产水时间,同时也增加了清洗难度,增加了反洗时间,大幅降低了产水时间比。产水时间比从设计的 30:3 降至 25:4,这

部分将降低 UF 产水能力约 10%。进一步地,清洗周期缩短,清洗时间延长,也降低了产水时间;同时,清洗水量的增加,降低了 UF 的回收率。清洗的影响使得 UF 产水能力降低约 10%。由于本项目承接污水厂出水,水质相比净水更为复杂。建议 UF 设计时,应当确定合理的清洗周期及反洗频率,以确保系统能达到设计负荷。

综上所述,UF 系统冬季无法达到满负荷运行,一方面是设计水温考虑不足、UF 膜设计通量取值过大导致,大概影响 9%;另一方面,对于 UF 处理污水厂出水水质特点预估不足,低估了其对 UF 膜系统的影响,导致反洗和清洗频率远高于设计,相当于设计 UF 膜组预留不足,这部分影响约占 20%。以污水厂出水作为原水,设计 UF 工艺时,相比净水工艺,应谨慎评估 UF 膜通量的取值,并且膜组预留应当充分。根据本项目水质,后续拟增加 UF 前的多介质过滤器,进一步保护 UF 膜系统,延长 UF 系统反洗及清洗周期,提高产水效率;同时增加 2 组 UF 系统,确保在冬季不利条件时,系统仍能满负荷运行。

## 2.2 RO 系统设计与实际运行分析

以单组 RO 系统运行 90 d 作为分析基础,表 3 列举了单组 RO 设计、夏季(>20℃)和冬季(10~15℃)的相关参数。RO 系统共 5 组,采用一级二段式,单组设计进水 252 m<sup>3</sup>/h,产水 181.5 m<sup>3</sup>/h,未设备用,进水膜通量 27.26 L/(m<sup>2</sup>·h),一段 26 支压力容器,二段 13 支压力容器,每支压力容器内 7 支膜组件。系统设有段间增压泵, $Q=128$  m<sup>3</sup>/h, $H=400$  kPa。设计清洗周期 90 d,单次清洗时间 24 h,杀菌周期为 7 d,单次杀菌时间为 2 h。实际运行中,清洗周期为 45 d,单次清洗时间为 40 h,杀菌周期为 3 d,杀菌时间夏季为 3.5 h、冬季为 2 h。夏季运行时,再生水厂的总负荷可达到设计值的 97.3%,基本达到满负荷水平,但相比设计值有降低,主要是受细菌滋生的影响,清洗周期和杀菌周期均较设计短 50%。清洗和杀菌时间的占用,以及对于产水的使用综合降低了全厂的负荷水平。

冬季运行时,受限于 UF 产水的影响,RO 系统未达满负荷运行。当进水压力提高到 2.2 MPa 时,产水量也仅能达到 170 m<sup>3</sup>/h,系统已达到极限(膜要求不超过 2.5 MPa),且 RO 高压运行,能耗较高,压差增长较快,会进一步增加清洗周期,不是经济可靠



的运行方式。实际运行中,RO 产水量  $160 \text{ m}^3/\text{h}$  时,进水压力  $1.8 \text{ MPa}$ ,此时 RO 产水量有 11% 的缺口。进一步分析,仍然是 RO 膜通量取值较高,温度考虑不充分,与超滤膜通量取值类似。

由于 RO 未设置备用,一旦出现设备故障停机,

则系统负荷率会进一步降低。目前,该厂已运行近 3 年,RO 部分膜组污染严重,仅靠在线清洗系统难以恢复,需定期进行离线清洗。但 RO 的设计也同样未考虑设备的维护、膜组的离线清洗,这也是实际运行达不到设计负荷的重要原因。

表 3 RO 系统的设计值及实际运行情况

Tab.3 Design value and actual operation performance of RO

项目	参数	设计值	夏季( $>20^\circ\text{C}$ )	冬季( $10\sim15^\circ\text{C}$ )	设计建议
基准	实际产水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	181.5	181.5	160	160
	分析周期/d	90	90	90	90
清洗	清洗周期/d	90	45	45	45
	清洗次数/次	1	2	2	2
	单次清洗时间/h	24	40	40	40
	清洗总时间/h	24	80	80	80
	单次清洗水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{次}^{-1}$ )	90	90	90	90
	清洗水量/ $\text{m}^3$	90	180	180	180
冲洗	冲洗周期/h	24	24	24	24
	冲洗时间/min	10	10	10	10
	冲洗次数/次	88.39	86.07	86.07	86.07
	冲洗总时间/h	14.73	14.34	14.34	14.34
	冲洗流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	110	110	110	110
	冲洗进水时间/min	10	10	10	10
	冲洗水量/ $\text{m}^3$	1 620.4	1 577.9	1 577.9	1 577.9
杀菌	杀菌周期/d	7	3	3	3
	杀菌时间/h	2	3.5	2	2
	杀菌次数/次	12.63	28.69	28.69	28.69
	杀菌总时间/h	25.25	100.41	57.38	57.38
	杀菌流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	110	110	110	110
	杀菌进水时间/min	40	40	40	40
	杀菌水量/ $\text{m}^3$	926.0	2 103.9	2 103.9	2 103.9
UF 用水	清洗水量/ $\text{m}^3$	1 875	2 500	5 000	5 000
产水	产水时间/h	2 096.0	1 965.2	2 008.3	2 008.3
	产水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	176.1	165.1	148.8	148.8
	净产水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	174.0	162.2	144.7	144.7
	组数/组	5.0	5.0	5.0	6.0
	负荷率/%	104.4	97.3	86.8	104.2

注: 冲洗次数 = (分析周期  $\times$  24 - 清洗次数  $\times$  单次清洗时间)/(冲洗周期 + 冲洗时间/60); 冲洗水量 = 冲洗次数  $\times$  冲洗流量  $\times$  冲洗时间/60; UF 用水 = 分析周期  $\times$  超滤清洗水量/3。

设计中应充分考虑温度影响,选择合理的设计膜通量。同时,应当考虑设备备用,用于设备检修以及 RO 离线清洗。拟增加一组 RO 系统,满足处理水量要求。同时考虑原水的影响,进行杀菌的设计优化。本项目原水为污水厂一级 A 达标出水,污水厂杀菌剂使用次氯酸钠。设计时考虑原水细菌较多,杀菌剂投加设计在调节池进水口。实际运行中发现,夏季水温高,细菌滋生速率较快,不论原水

投加多少次氯酸钠,高效石灰软化沉淀池出水游离氯含量都较低,均在  $0.1 \text{ mg/L}$  以下。而 RO 进水游离氯(还原剂投加之前)一般为  $0.05\sim0.1 \text{ mg/L}$ ,无法达到控菌的目的,且增加了 RO 非氧化杀菌剂杀菌的频率及浓度,增加了药耗。拟增加高效沉淀池出水口、UF 产水池次氯酸钠投药点。运行中需要密切监控 UF 产水池游离氯含量,防止游离氯过高影响 RO 膜的安全运行。

### 3 改造后运行效果

该系统于 2019 年进行了改造。增加 UF 前的多介质过滤器,强化 UF 预处理;增加高效池出水口、超滤产水池次氯酸钠投药点,强化控菌;增加 2 组 UF 系统、1 组 RO 系统,与现有 UF、RO 单组膜组相同,使系统能够达到满负荷运行。改造后系统可达到满负荷运行,净产水量在冬季时可达 20 000 m<sup>3</sup>/d,达到改造预期目的。建议类似项目在冬季进行中试,采用最不利水温时的膜通量,并应充分考虑自用水量的损耗等。

### 4 结论

① 某再生水厂“双膜”系统冬季最大净产水规模仅能达到设计值的 80%;UF 及 RO 系统设计时,膜通量取值偏大,导致实际冬季产水量不足;同时,未充分考虑污水厂出水水质成分复杂、细菌含量高等特点,UF 未设计前处理防护工艺,UF 清洗反洗周期取值偏高,RO 杀菌频率取值偏低,导致系统自用水量增加;系统设计预留不足,未考虑 RO 离线清洗及设备维修的膜组备用。

② 通过强化预处理、强化控菌、增加膜组,如增加 UF 前的多介质过滤器,增加高效池出水口、UF 产水池次氯酸钠投药点,增加 2 组 UF、1 组 RO,使系统能够达到满负荷运行。

③ 建议类似项目在冬季进行中试,采用最不利水温时的膜通量,并应充分考虑自用水量的损耗等,同时应参考《城镇污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2016)的推荐值。

#### 参考文献:

- [1] 刘艳军,周艳. 双膜法处理化工废水及回用工程应用研究[J]. 工业水处理,2019,39(12):107-109.  
Liu Yanjun, Zhou Yan. Technical application and research of UF and RO membranes in chemical wastewater treatment and reuse[J]. Industrial Water Treatment,2019,39(12):107-109(in Chinese).
- [2] 姚吉,张稳妥,滕良方,等. “双膜工艺”在工业区污水处理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).

- [3] 苗雪娜,李红岩,祁誉,等. 以超滤与反渗透为主体工艺的应急净水车设计方案[J]. 净水技术,2019,38(8):17-20,25.  
Miao Xuena,Li Hongyan,Qi Yu,et al. Design proposal of emergency water purification vehicle with principal processes of UF and RO[J]. Water Purification Technology,2019,38(8):17-20,25(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 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).



作者简介:王金龙(1988-),男,辽宁大连人,本科,工程师,主要从事污水、中水精制回用厂(双膜)运行管理工作。

E-mail:15712796070@163.com

收稿日期:2020-04-04