

龚天翼, 陈振洲, 周向韧. 双膜法工艺应用于污水再生处理的经济适用性分析[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 92-98.

Gong T Y, Chen Z Z, Zhou X R. Analysis of economic applicability for application of the dual-membrane process in wastewater reclamation treatment [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 92-98.

## 双膜法工艺应用于污水再生处理的经济适用性分析

龚天翼<sup>1</sup>, 陈振洲<sup>2</sup>, 周向韧<sup>3,\*</sup>

(1. 宁波市水务环境集团股份有限公司, 浙江宁波 315100; 2. 宁波市水务环境集团股份有限公司工程建设管理分公司, 浙江宁波 315153; 3. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200091)

**摘要** 【目的】在水资源日益紧缺的背景下, 实现污水的深度处理与安全回用已成为缓解供需矛盾的重要途径。双膜法工艺, 即超滤与反渗透相结合的处理技术, 已成为实现污水高标准资源化利用的关键路径之一。本文探究了双膜法工艺对污水进行再生处理的适用性及经济性, 为相关工程提供适用性及成本参考。【方法】根据污水再生利用的水质要求, 对污水再生处理及浓废水处理处置工艺进行了比选, 并对双膜法工艺应用于污水再生处理的经济性进行了分析论证。【结果】双膜法工艺在污水再生处理上具有较强的适用性, 双膜法浓水处理的主要目标污染物为化学需氧量(COD)、总磷、总氮等, 推荐采用反硝化生物滤池脱氮、气浮除磷和活性炭吸附再生去除 COD, 双膜法工艺总体运行成本约为 0.975 元/m<sup>3</sup>。其中, 脱盐阶段超滤预处理运行成本为 0.100 元/m<sup>3</sup>、反渗透脱盐运行成本为 0.472 元/m<sup>3</sup>、反硝化脱氮运行成本为 0.169 元/m<sup>3</sup>、气浮除磷运行成本为 0.037 元/m<sup>3</sup>、活性炭除 COD 运行成本为 0.197 元/m<sup>3</sup>。【结论】双膜法工艺在水资源短缺的地区具有较好的经济适用性, 是减少水环境污染、缓解水资源紧缺矛盾的可行技术选择。

**关键词** 双膜法; 超滤膜; 反渗透脱盐; 浓废水; 污水再生利用; 运行成本

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0092-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.010

## Analysis of Economic Applicability for Application of Dual-Membrane Process in Wastewater Reclamation Treatment

Gong Tianyi<sup>1</sup>, Chen Zhenzhou<sup>2</sup>, Zhou Xiangren<sup>3,\*</sup>

(1. Ningbo Water Environment Group Co., Ltd., Ningbo 315100, China;

2. Engineering Construction Management Branch of Ningbo Water Environment Group Co., Ltd., Ningbo 315153, China;

3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200091, China)

**Abstract** [Objective] With increasing water scarcity, advanced wastewater treatment and reuse are crucial. The ultrafiltration-reverse osmosis dual-membrane process is a pivotal technology for high-standard water reclamation. This paper investigates the applicability and economic feasibility of the dual-membrane process for wastewater reclamation, providing valuable references for related projects in terms of suitability and cost. [Methods] Based on the water quality requirements for wastewater reuse, various wastewater reclamation and concentrated wastewater treatment processes were compared and evaluated. The economic feasibility of applying the dual-membrane process to wastewater reclamation was thoroughly analyzed. [Results] The dual-membrane process was highly suitable for wastewater reclamation. The primary target pollutants in the treatment of dual-membrane concentrate were chemical oxygen demand (COD), total phosphorus, and total nitrogen. The paper recommended using a denitrifying biofilter for nitrogen removal, air flotation for phosphorus removal, and activated carbon adsorption for COD removal. The overall operating cost of the dual-membrane process was approximately 0.975 yuan/m<sup>3</sup>. The operating costs were quantified as follows: 0.100 yuan/m<sup>3</sup> for ultrafiltration pretreatment, 0.472 yuan/m<sup>3</sup> for reverse osmosis desalination; 0.169 yuan/m<sup>3</sup> for denitrification, 0.037 yuan/m<sup>3</sup> for phosphorus removal by

[收稿日期] 2024-12-26

[基金项目] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司“拂晓计划”(K2024N013A)

[作者简介] 龚天翼(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事给排水技术研发工作, E-mail: 605048799@qq.com。

[通信作者] 周向韧(1995—), 男, 工程师, 主要从事膜处理技术研发工作, E-mail: zhouxiangren@smedi.com。

flotation, and 0.197 yuan/m<sup>3</sup> for COD removal by activated carbon. [ **Conclusion** ] In conclusion, the dual-membrane process exhibits excellent applicability and economic feasibility, particularly in regions facing water resource shortages, and thus serves as a viable technological option for mitigating water pollution and alleviating water scarcity.

**Keywords** dual-membrane; ultrafiltration ( UF ) membrane; reverse osmosis ( RO ) desalination; concentrated wastewater; wastewater reclamation; operation cost

近年来,随着经济的快速发展,城市用水量和污水排放量急剧增加,以水资源短缺和水环境恶化为特征的水危机越来越严重,已成为制约我国社会和经济发展的突出问题。城市污水的再生回用成为首选方案,它既能减少水环境污染,又可以缓解水资源紧缺矛盾,是贯彻可持续发展战略的重要措施,也是城市污水处理厂节能减排的重要途径<sup>[1]</sup>。

2021年1月,国家发展改革委联合九部门印发《关于推进污水资源化利用的指导意见》,意见指出,污水经无害化处理达到特定水质标准,可作为再生水替代常规水资源,用于工业生产、市政杂用等,对优化供水结构、增加水资源供给、缓解供需矛盾具有重要意义。

## 1 再生水处理工艺

### 1.1 污水再生利用的水质要求

城市污水再生利用按用途分为农、林、牧、渔业用水,城市杂用水,工业用水,环境用水和补充水源

水。再生水用作工业用水水源,主要指锅炉补给水、工艺与产品用水、冷却用水、洗涤用水水源。作为冷却用水或洗涤用水,污水处理厂的达标出厂水一般可直接使用;作为锅炉补给水的水源,尚需再进行软化、除盐等再处理;作为工艺与产品用水,一般需要根据不同工艺系统对用水水质要求的不同进行再处理<sup>[2]</sup>。

根据大量污水再生利用作为工业用水的工程案例,针对污水处理厂生物处理后达标出水作为工业用水时<sup>[3-4]</sup>,主要对硬度、电导率以及氯离子等有较高的要求。因此,污水再生利用作为工业用水,主要需进行脱盐处理。

### 1.2 再生水脱盐处理工艺

水处理的脱盐方法很多,但达到商品化和工业生产规模的仅限于低温蒸馏、多级闪蒸、压气蒸馏、离子交换、电渗析和反渗透等几种<sup>[5]</sup>,其他方法实际应用较少,具体如表1所示。

表1 常用除盐工艺特性比较

Tab. 1 Comparison of Characteristics of Common Desalination Processes

项目	蒸馏	离子交换	电渗析	反渗透
技术成熟可靠性	高	高	高	高
对预处理要求	不高	高	低	高
清洗或再生要求	不高	树脂再生	高	高
同时去除有机物和细菌的能力	有	较差	无	有
安装、操作管理	简单	复杂	复杂	方便
一次性投资	特大	特大	大	大
能耗和成本	高	高	较高	较高
城市污水再利用的适用性	不适用	较适用	较适用	适用
大规模工程实例	无	少	少	多
产品国产化情况	有	有	有	有

大量工程实践发现,蒸馏法主要适用于以海水为原水的热力发电厂(因使用电厂余热而具有价格优势),在城市污水再生利用方面尚无大规模案例。离子交换、电渗析和反渗透均可用于城市污水再生利用的脱盐处理,且脱盐效果均较好。

离子交换是指采用离子交换剂和水溶液中可交

换离子之间发生等物质量规则的可逆性交换,使水质改善而离子交换剂的结构并不发生实质性变化的水处理方式。

反渗透是一种十分有效的膜分离单元操作技术,在海水淡化、苦咸水淡化、纯水制备、超纯水制备以及废水处理方面的成功应用,使膜技术成为水资

源开发和提高水质的重要手段之一。

电渗析是一种电化学分离过程,离子在直流电压驱动下透过离子交换膜从而实现分离。倒极电渗析是一种具有连续自清洁特征的电渗析过程,其通过周期性改变直流电压的极性来实现浓水流与淡水流的周期性切换,减少膜表面结垢以及胶体物质在膜表面的沉积,破坏新生成的沉积,并在沉积对膜造成危害前将其冲洗掉。

离子交换法工程投资及运行成本均较高,且污水再生利用的应用案例较少。电渗析法对预处理要求较低,一次性投资与反渗透系统相当,运行能耗比反渗透低,但对污水中的有机物和微生物无去除效果,且国内应用电渗析技术进行污水再生利用的工程案例较少。反渗透技术成果可靠,运行管理方便,大规模的应用案例较多<sup>[6]</sup>,且随着醋酸纤维、聚酰胺卷式、中空纤维膜组件的大规模生产,反渗透的设备投资和运行成本也在不断下降。因此,污水再生利用的脱盐工艺优先推荐反渗透技术。

### 1.3 反渗透预处理工艺

反渗透因特殊的膜结构及过滤方式,对进水水质要求较高,往往需要预处理。反渗透系统预处理单元一般为超滤或多介质过滤。考虑管理便利性、出水水质稳定性,为保证后续脱盐系统可靠运行和延长使用寿命,优先推荐采用超滤工艺。超滤膜可分为压力式与浸没式2类,2种形式的超滤膜系统各有优点和适用性,目前国内压力式与浸没式膜系统均有工程实例。从城市污水再生利用角度,浸没式超滤膜对含有复杂组分的城市污水适应性更强,抗污染能力较好,且系统跨膜压差低,运行能耗低。因此,反渗透预处理优先推荐使用浸没式超滤膜。

### 1.4 双膜法脱盐处理工艺

综上,以“浸没式超滤膜预处理+反渗透”的双膜法脱盐工艺(图1)为例,首先通过浸没式超滤膜对原水进行预处理,有效去除悬浮物(SS)、胶体和部分有机物,从而为后续反渗透单元提供高质量的进水。反渗透单元进一步对经过预处理的水进行深度脱盐,确保出水水质满足用水标准。



图1 双膜法脱盐处理工艺路线

Fig. 1 Process Flow of the Dual-Membrane Desalination Treatment

## 2 双膜浓废水处理处置

### 2.1 双膜浓废水的主要去向

双膜法工艺对污水中的有机、无机污染物均有较好的截留,在生产高品质再生水的同时伴随着污染物在浓废水中的富集。随着环保要求的不断提高,双膜法产生的浓废水的处理处置受到越来越多的关注。根据已建双膜法再生水处理工程的相关案例,双膜浓废水的主要去向为2种:一是回到污水处理厂净水工艺前段或中间工艺段,与待处理污水混合后进行再处理;二是对浓废水中的主要污染物进行再处理,与污水处理厂的尾水一同达标排放。当污水处理厂规模较大,双膜浓废水的水量相对污水处理厂的规模较小时,浓废水直接回用至污水处理工艺流程中,可节省浓废水处理工程的投资;如双膜浓废水的水量较大,回到污水处理工艺流程中污水处理负荷增加较多,影响处理效果,此时应对浓废水进行单独处理。

本文中的某双膜法污水再生处理厂处理的浓水含盐量较高,影响污水处理效果,且会增加双膜系统的运行压力及运行成本。此外,该污水厂污水处理前段工艺为政府财政负担的公共服务,而双膜法处理后的再生水为企业获得收益的工业产品,双膜法浓水为企业工业产品的附属产物,因此单独进行处理。

### 2.2 双膜浓废水处理主要目标污染物及工艺

双膜处理工艺过程中产生的废水包括反渗透浓水和超滤冲洗废水,反渗透浓水的主要污染物为化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)及无机盐类;超滤冲洗废水的主要污染物为TP。为达到污水处理厂的排放标准,COD、TP及TN是浓废水处理的主要控制指标,同时需关注高含盐量对浓废水处理过程的影响。

#### 2.2.1 COD去除工艺分析

目前,污水中COD去除的主流工艺包括3种:活性炭吸附再生法、芬顿氧化法和臭氧氧化法。

活性炭吸附再生法是利用活性炭较大的比表面积、多功能吸附位及丰富的表面化学结构,对废水中的五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、COD进行吸附去除,吸附饱和后的活性炭需要进行活化再生,恢复其吸附能力,重复使用;芬顿氧化法是通过外加的氧化剂与芬顿药剂在适当的pH下反应产生羟基自由基,氧

化分解有机物;臭氧氧化体系具有较高的氧化还原电位,可以直接发生氧化反应或通过羟基自由基氧化废水中的大部分有机污染物。

臭氧氧化法处理效果较好,且占地面积小,建设投资低,但运行成本相对较高;芬顿氧化法处理效果好,建设投资低于臭氧氧化法和活性炭吸附再生法,但运行成本高,且产生的污泥(部分地区定义为危废)较多;活性炭吸附再生法占地面积较大,建设投资相对较高,但处理效果稳定,且厂内原位再生运行成本较低。在用地面积充足的情况下,优先推荐活性炭吸附再生工艺。

### 2.2.2 TP 去除工艺分析

污水中的磷可以通过化学和生物 2 种方法去除。生物除磷是一种相对经济的除磷方法,但双膜

工艺的进水为污水厂经生物处理后的出水,生物除磷挖潜的能力有限,难以保证出水 TP 达标。因此,双膜浓废水的除磷工艺推荐采用后置化学除磷。

后置化学除磷通过投加混凝剂形成沉淀物,后设置固液分离装置进行分离,根据分离方式的不同,主要包括混凝沉淀池或气浮池。考虑到双膜浓废水中的 SS 含量较低,混凝后浓废水中的磷难以产生大的絮体,沉淀法可能去除效果不好,优先推荐气浮除磷工艺。

### 2.2.3 TN 去除工艺分析

目前,去除 TN 的工艺主要有两大类,一类是无外加有机碳源的自养或混合营养反硝化,另一类是有外加有机碳源的异养反硝化。常用脱氮方式对比如表 2 所示。

表 2 常用脱氮工艺对比分析  
Tab. 2 Comparison and Analysis of Common Denitrification Processes

项目	无外加有机碳源的反硝化		有外加有机碳源的反硝化	
	自养反硝化	混合营养反硝化	反硝化深床滤池	反硝化生物滤池
原理	以可降解载体作为滤料,自养反硝化菌在载体上形成生物膜,以还原型无机物作为电子供体,CO <sub>2</sub> 作为无机碳源,实现脱氮	利用无机碳源(CO <sub>2</sub> )及水中剩余有机物代替传统有机碳源投加,采用“脱氧-脱氮”双层复合活性生物填料代替传统石英砂,实现混合营养型生物脱氮	通过过滤、碳源投加控制、微絮凝过滤等机理在一池内完成 SS、TN、TP 的去除,是集生物脱氮及过滤功能合二为一的处理单元;对 SS、TN 和 TP 均有较好去除效果	待处理水从滤池底部进入、上部流出,利用滤床附着的生物膜中反硝化菌将硝态氮还原成氮气,降低出水 TN 含量,同时具有过滤去除 SS、一定量 TP 功能
容积负荷	低	低	较高	高
脱氮能力	较好	较好	较差	好
占地面积	较大	大	较大	较小
设备投资	高	高	较低	较低
运行药耗	滤料补充	滤料补充	碳源投加	碳源投加
运行电耗	较低	较高	较低	较低
优点	不需投加碳源,不受进水溶解氧影响	不需投加碳源,不受进水溶解氧影响	工艺成熟,投资较低	工艺成熟,投资较低
缺点	设备费用较高,工程案例很少	设备费用较高,运行电耗较高,工程案例很少	运行药耗较高,脱氮能力受限,需额外设驱氮装置,运行难度大	运行药耗较高

双膜再生水处理工艺的进水为污水处理厂的达标尾水,尾水中 TN 质量浓度一般小于 15 mg/L,经双膜工艺处理后,浓废水中的 TN 质量浓度一般为 30~50 mg/L,排放标准一般仍需低于 15 mg/L。故双膜浓废水的 TN 去除量一般为 15~35 mg/L,反渗透浓水中较高的含盐量(溶解性总固体质量浓度为 8 000~10 000 mg/L),对脱氮过程存在一定影响,主要通过渗透压胁迫影响细胞活性,并可能抑制关键反硝化酶

的功能。然而,通过梯度升盐驯化或投加高效耐盐反硝化菌种,生物系统可逐渐适应高盐环境,并将 TN 质量浓度稳定在 1~10 mg/L 的较低水平<sup>[7]</sup>。

无外加有机碳源的自养/混合营养反硝化脱氮方式不受进水溶解氧影响,无有机碳源消耗,但滤料有消耗需补充,容积负荷较低,占地面积大,且多为专利产品,土建及设备投资较高,高回流比时的运行电耗也较高。目前,国内双膜浓废水脱氮采用自养

反硝化工艺的工程案例很少。有外加有机碳源的反硝化深床滤池,建设投资较低,但脱氮能力受限,下向流系统需额外设驱氮装置,容积负荷大时驱氮频繁,运行难度大,双膜浓废水脱氮采用反硝化深床滤池的案例不多。

有外加有机碳源的反硝化生物滤池,容积负荷较高,脱氮能力较强,占地面积相对较小,建设投资相对较低,针对反渗透浓水的高盐高浓度氮去除工程案例较多,应用较为成熟。运行时需合理控制进水溶解氧含量。考虑双膜浓废水的高盐条件及高脱氮需求,优先推荐使用反硝化生物滤池进行双膜浓废水脱氮。

### 2.3 双膜浓废水处理工艺路线

综上,双膜浓废水的处理工艺主要采用多种技术手段相结合的方式,以实现高效的污染物去除,建议的工艺路线如图2所示。利用活性炭的大比表面积和强吸附能力去除COD,并通过再生过程恢复其吸附性能;采用后置投加絮凝剂,通过气浮法实现TP的分离和去除;通过反硝化脱氮工艺,利用投加有机碳源的反硝化滤池有效降低废水中的氮含量。这一系列处理步骤协同作用,确保了双膜浓废水处理的高效性和稳定性。

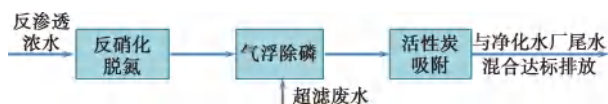


图2 双膜浓废水处理工艺路线

Fig. 1 Process Flow of the Treatment Process for Dual-Membrane Concentrated Wastewater

## 3 双膜法工艺运行成本

本文基于某双膜法污水再生处理厂的实际运行数据,系统分析了超滤-反渗透双膜工艺的能耗、药剂消耗及膜组件更换等关键成本构成要素,为优化再生水厂运行参数及降低处理成本提供数据支撑。

### 3.1 超滤和反渗透工艺运行成本

#### 3.1.1 超滤膜运行成本

超滤膜系统的直接运行成本主要包括电耗、药耗以及膜更换费用。

超滤运行电耗主要为克服跨膜压差引起的水头损失。浸没式超滤膜系统设计使用寿命(按7年计)内的平均跨膜压差为3.5 m,运行电耗成本约为0.009元/m<sup>3</sup>[电价按0.64元/(kW·h)计]。药剂消耗主要为维护性化学清洗和恢复性化学清洗所用的

次氯酸钠、柠檬酸、氢氧化钠及还原剂亚硫酸氢钠。按照次氯酸钠(10%质量分数)810元/t,柠檬酸(30%质量分数)7850元/t,氢氧化钠(30%质量分数)6000元/t,还原剂亚硫酸氢钠(30%质量分数)18000元/t计,药耗约为0.026元/m<sup>3</sup>。膜按8年折旧,以平均通量为28L/(m<sup>2</sup>·h)计,参照国内超滤膜市场价格,超滤膜更换成本约为0.040元/m<sup>3</sup>。

以上电耗、药耗及膜更换合计直接运行成本约为0.075元/m<sup>3</sup>。双膜再生水处理最终产品为反渗透产水,反渗透系统回收率为75%,超滤单元产水折算反渗透产水的运行费用为0.100元/m<sup>3</sup>。

#### 3.1.2 反渗透运行成本

反渗透膜系统的直接运行成本主要包括电耗、药耗及膜更换费用。

反渗透运行电耗主要为高压泵的运行电耗,以平均水温为25℃计算,高压泵的运行耗电量约为0.283kW·h/m<sup>3</sup>,则运行电耗约为0.181元/m<sup>3</sup>[电价按0.64元/(kW·h)计]。药剂消耗主要为阻垢剂及化学清洗所用的柠檬酸、氢氧化钠和还原剂亚硫酸氢钠,药耗成本约为0.169元/m<sup>3</sup>。膜按7年折旧,以平均通量为18L/(m<sup>2</sup>·h)计,参照国内反渗透膜市场价格,反渗透膜更换成本约为0.122元/m<sup>3</sup>。

以上电耗、药耗以及膜更换合计直接运行成本约为0.472元/m<sup>3</sup>。

### 3.2 浓废水处理运行成本

#### 3.2.1 浓废水水质分析

以国内某双膜法再生水处理工程的浓废水水质监测数据为例进行分析,超滤废水和反渗透浓水中的主要水质指标如图3所示。

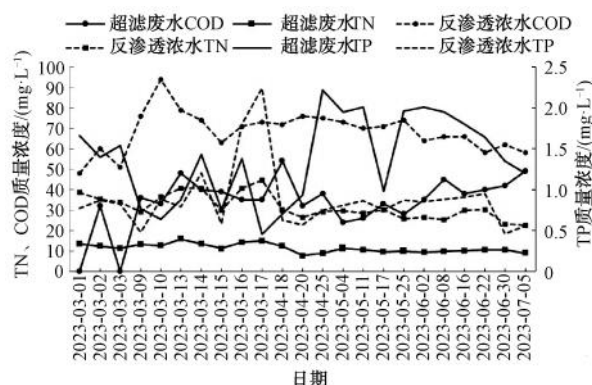


图3 国内某双膜再生水处理工艺浓废水水质监测数据

Fig. 3 Concentrated Wastewater Quality of a Domestic Dual-Membrane Reclaimed WWTP

浓废水设计进出水水质指标如表 3 所示。

表 3 国内某双膜再生水处理工程浓废水处理设计进出水水质

Tab. 3 Design Influent and Effluent Quality of Concentrated Wastewater in a Domestic Dual-Membrane Reclaimed WWTP

水质指标	设计进水最大 质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	设计进水平均 质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	设计出水 质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
TN	45.0	31.6	12.0
TP	1.4	1.0	0.3
COD	70	61	40

### 3.2.2 反硝化脱氮运行成本

反渗透浓水进入反硝化单元进行脱氮处理(超滤废水 TN 含量较低,不进入反硝化单元,直接进入后续除磷和活性炭吸附单元)。反硝化脱氮运行成本主要包括电耗和药耗。

反硝化生物滤池运行电耗主要为反冲洗设备及循环回流设备的提升消耗。以设计平均去氮量为  $20\text{ mg/L}$  计算,浓废水脱氮单元运行电耗为  $0.083\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,运行电耗成本约为  $0.053\text{ 元}/\text{m}^3$  [电价按  $0.64\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  计]。反硝化生物滤池运行药耗主要为碳源投加,以设计平均去氮量为  $20\text{ mg/L}$  计算,碳源乙酸钠纯药剂消耗为  $113.6\text{ mg/L}$ ,以乙酸钠(20% 质量分数)  $800\text{ 元}/\text{t}$  计,运行药耗约为  $0.454\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

以上电耗、药耗合计,浓水处理反硝化脱氮直接运行成本约为  $0.507\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

双膜再生水处理最终产品为反渗透产水,反渗透系统回收率为 75%,超滤系统回收率为 90%,折算反渗透产水的脱氮运行费用为  $0.169\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

### 3.2.3 气浮除磷运行成本

反渗透浓水和超滤废水一同进入气浮单元进行除磷。气浮除磷运行成本主要包括电耗和药耗。

气浮除磷运行电耗主要为回流泵及搅拌机等。以设计平均 TP 去除量为  $0.7\text{ mg/L}$  计算,浓废水除磷单元运行电耗为  $0.037\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,运行电耗成本约为  $0.023\text{ 元}/\text{m}^3$  [电价按  $0.64\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  计]。气浮除磷运行药耗主要为混凝剂投加,以设计平均 TP 去除量为  $0.7\text{ mg/L}$  计算,运行药耗约为  $0.053\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

以上电耗、药耗合计,浓废水处理气浮除磷直接运行成本约为  $0.076\text{ 元}/\text{m}^3$ ,按最终反渗透产水量

折算后的浓废水除磷运行费用为  $0.037\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

### 3.2.4 活性炭吸附及再生运行成本

反渗透浓水和超滤废水一同进入活性炭吸附单元进行 COD 去除。活性炭吸附及再生运行成本主要包括电耗、燃气、水耗及炭损耗。

运行电耗主要为工艺水泵和风机。以设计平均 COD 去除量为  $21\text{ mg/L}$  计算,活性炭吸附再生工艺的运行电耗为  $0.14\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,运行电耗约为  $0.090\text{ 元}/\text{m}^3$  [电价按  $0.64\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  计]。以设计平均 COD 去除量为  $21\text{ mg/L}$  计算,天然气消耗量约为  $0.069\text{ m}^3/\text{m}^3$  (标准状况下),天然气以  $3.5\text{ 元}/\text{m}^3$  计,则运行天然气费约为  $0.242\text{ 元}/\text{m}^3$ 。系统用水点主要包括废活性炭洗炭用水、锅炉给水、急冷水、湿法脱酸补充水等,处理新鲜水耗量约为  $7.6\times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{m}^3$ ,用水单价按  $2.5\text{ 元}/\text{t}$  计,则水耗为  $0.002\text{ 元}/\text{m}^3$ 。活性炭再生量为  $0.152\text{ kg}/\text{m}^3$ ,炭损率为 5%,新炭  $1\text{ 万元}/\text{t}$ ,则新炭补充费为  $0.076\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

以上电耗、药耗合计,活性炭吸附再生法去除 COD 的直接运行成本约为  $0.410\text{ 元}/\text{m}^3$ ,按最终反渗透产水量折算后的浓废水除 COD 运行费用为  $0.197\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

### 3.2.5 双膜法工艺总体运行成本

综上,本项目双膜处理及浓废水处理,折算成产水直接运行成本如表 4 所示,总运行成本为  $0.975\text{ 元}/\text{m}^3$ 。在水资源短缺地区,获取替代水源的成本通常较高。例如,部分地区的工业自来水价格在  $1.3\text{ 元}/\text{m}^3$  以上,水资源短缺地区价格更高;海水淡化采用反渗透工艺运行成本在  $2.92\text{ 元}/\text{m}^3$  以上,若采用低温多效工艺运行成本则在  $4.25\text{ 元}/\text{m}^3$  以上<sup>[8]</sup>。相比之下,本文所述的双膜法工艺总运行成本为  $0.975\text{ 元}/\text{m}^3$ ,具有较好的经济性。

## 4 结论

(1)随着经济的快速发展,城市用水量和污水排放量急剧增加,水危机越来越严重,已成为制约我国社会和经济发展的突出问题。城市污水的再生回用对于减少水环境污染、缓解水资源紧缺矛盾、贯彻可持续发展战略和城市污水处理厂节能减排具有重要意义。

(2)城市污水再生利用作为工业用水主要需进行脱盐处理,超滤膜与反渗透联用的双膜法工艺因其成熟稳定、运行管理方便,在再生水脱盐工艺中具

表 4 双膜法再生水处理工艺总体运行成本  
Tab. 4 Total Operation Cost of Dual-Membrane Reclaimed Water Treatment Process

项目	超滤	反渗透	反硝化	气浮	活性炭
电耗成本/(元·m <sup>-3</sup> )	0.009	0.181	0.053	0.023	0.090
药耗成本/(元·m <sup>-3</sup> )	0.026	0.169	0.454	0.053	—
膜元件折旧费/(元·m <sup>-3</sup> )	0.040	0.122	—	—	—
天然气费/(元·m <sup>-3</sup> )	—	—	—	—	0.242
自来水费/(元·m <sup>-3</sup> )	—	—	—	—	0.002
炭补充费/(元·m <sup>-3</sup> )	—	—	—	—	0.076
直接成本/(元·m <sup>-3</sup> )	0.075	0.472	0.507	0.076	0.410
按反渗透产水折算后的直接运行成本/(元·m <sup>-3</sup> )	0.100	0.472	0.169	0.037	0.197

有较强的适用性。

(3)双膜法浓废水水量较小时,可回用至污水处理工艺中,如水量较大影响污水厂运行时,需进行处理;结合浓废水的特性及达标排放的要求,其处理的主要目标污染物为 COD、TP、TN 等。

(4)针对目标污染物论证了不同工艺的去除效果及适用性,推荐采用反硝化生物滤池脱氮、气浮除磷和活性炭吸附再生去除 COD。

(5)分析了超滤加反渗透工艺及浓废水处理工艺的直接运行成本,双膜法处理工艺总运行成本约为 0.975 元/m<sup>3</sup>,在水资源短缺的地区具有较好的经济性。

### 参考文献

[ 1 ] 傅涛,郑兴灿,陈吉宁. 再生水的战略思考与定位[J]. 中国给水排水, 2007, 23(18): 5-9.  
Fu T, Zheng X C, Chen J N. Strategy and orientation concerning wastewater reclamation[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(18): 5-9.

[ 2 ] 张昱,郑兴灿,李殿海,等. 城市污水再生利用及水质安全保障的关键技术集成与示范应用[J]. 给水排水, 2013, 39(4): 9-12.  
Zhang Y, Zheng X C, Li D H, et al. Integration and demonstration application of key technologies for urban sewage recycling and water quality safety guarantee [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(4): 9-12.

[ 3 ] 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 J, Zhang W T, Teng L F, 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.

[ 4 ] 关代宇. 万吨级再生水厂的运营分析与探讨[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4): 86-90.  
Guan D Y. Analysis and discussion on operation of 10000 t/d reclaimed water treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 86-90.

[ 5 ] 高文宝,刘学明. 某再生水厂改造工程除盐工艺选择及运行效果[J]. 山西建筑, 2011, 37(21): 107-108.  
Gao W B, Liu X M. On selection of desalting craft and its operation effect in reconstruction project of some regenerated water works[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(21): 107-108.

[ 6 ] 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 J L. Discussion and improvement on design of UF and RO process in a water reclamation plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 120-125.

[ 7 ] Zhang Z S, Guo Y D, Guo L, et al. Elucidating salinity adaptation and shock loading on denitrification performance: Focusing on microbial community shift and carbon source evaluation[J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123030. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123030.

[ 8 ] 闫玉莲,吴云奇,吴水波,等. 海水淡化在供水行业成本优势潜力分析[J]. 盐科学与化工, 2018, 47(9): 16-20.  
Yan Y L, Wu Y Q, Wu S B, et al. Analysis of cost potential of seawater desalination in water supply industry[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2018, 47(9): 16-20.