

超滤膜系统在高碑店再生水厂升级改造中的应用

陈翔, 侯晓庆, 郭奏恺, 颜欣欣, 崔鹏飞
(北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206)

摘要: 碧水源超滤膜系统作为深度处理工艺单元用于北京市高碑店再生水厂改造, 该系统由进水、膜过滤、反冲洗等单元组成, 处理规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。国内目前没有类似规模的超滤系统, 其日产水量大、系统复杂、施工空间有限等都是设计中考虑的重点。在膜系统调试运行过程中出现水锤、管廊支架晃动、加药装置泄漏、过滤器堵塞等问题, 采取应对措施后得以解决。超滤膜系统通水运行约 10 个月后的性能测试显示, 系统总体运行稳定, 水回收率 $>90\%$, 耗电量约 $0.1 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 平均出水浊度约 0.2 NTU 。

关键词: 再生水厂; 升级改造; 超滤膜; 回收率; 浊度

中图分类号: TU99 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)10-0077-05

Application of Ultrafiltration Membrane System in the Upgrading Project of Gaobeidian Wastewater Recycling Plant

CHEN Xiang, HOU Xiao-qing, GUO Zou-kai, YAN Xin-xin, CUI Peng-fei
(Beijing OriginWater Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: As an advanced wastewater treatment process, OriginWater ultrafiltration membrane system has been used in the upgrading project of Gaobeidian Wastewater Recycling Plant in Beijing. The system consists of inflow unit, membrane filtrating unit, membrane backwashing unit, etc. The treating capacity of this system is about $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. However there have been no such scale projects to refer, and it is important to take into consideration its large daily water production, complex system, small occupation of land in the design. Appropriated measures were tanking to solve the operation problems found in this project, such as water hammer, pipeline and holder shaking, dosing equipment leaking, and filtrator congestion. The ultrafiltration membrane system was tested after working for about 10 months. Test results indicated the ultrafiltration membrane system worked steadily on the whole. Water recycling rate was more than 90% . Power consumption was about $0.1 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$. Average effluent turbidity was about 0.2 NTU .

Key words: wastewater recycling plant; upgrading project; ultrafiltration membrane system; recycling rate; turbidity

目前,超滤膜系统已在饮用水、工业废水、市政污水处理等领域得到广泛应用。与传统工艺相比,其具有出水水质好、出水稳定、自动化程度高、占地面积小等优势。

1 高碑店再生水厂概况

高碑店再生水厂是北京市建设的第一座大型城

市污水处理厂,一期、二期工程分别于 1993 年和 1999 年竣工通水,主体采用 AAO 工艺,设计处理规模为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水水质执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的二级排放标准。2014 年开始进行提标改造,改造后出水主要用作景观环境用水、工业用水,少部分用于城市杂用水。原处理工

艺难以满足上述用水需求,因此需对原有工艺进行改进,在优化原有生化处理段的同时增加深度处理单元。该改造工程于2014年1月—2016年6月实施建设,2016年8月完成通水运行,其中深度处理单元采用碧水源超滤膜系统(后称OWUF膜系统)。升级改造后,厂区出水水质满足《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)、《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水体等要求(除TN外),其中要求浊度 <0.5 NTU,其他主要出水水质:COD ≤ 30 mg/L, BOD₅ ≤ 6 mg/L,氨氮 ≤ 1 mg/L,总氮 ≤ 10 mg/L,总磷 ≤ 0.3 mg/L, pH值为6~9。

2 改造思路及工艺流程

高碑店再生水厂处理规模为 100×10^4 m³/d,考虑改造难度、可实施性、运行费用等因素,将现有污水处理设施进行升级改造,采用改进型AAO(填料)工艺,新增深度处理单元,改造后整体工艺路线为AAO+反硝化生物滤池+超滤膜。超滤膜处理单元对非溶解态污染物具有极高去除率,对浊度的去除率 $>99.9\%$,可以最大化地去除SS,保证最终出水浊度满足要求。改造后工艺流程如图1所示。

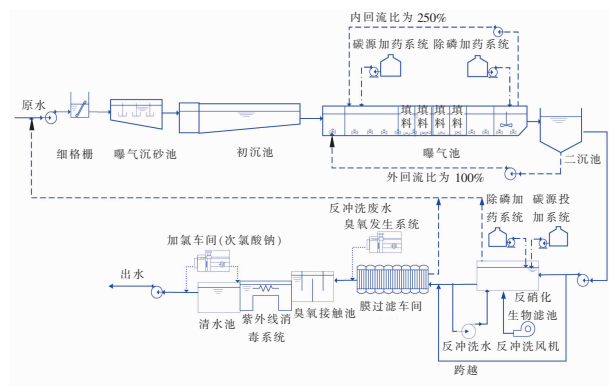


图1 高碑店再生水厂改造后工艺流程

Fig.1 Flow chart of Gaobeidian Wastewater Recycling Plant after upgrading

3 OWUF膜系统设计

本项目OWUF膜系统分4个独立系列,每系列产水量为 25×10^4 m³/d。该系统由进水、膜过滤、反冲洗、化学清洗及中和、压力检测等单元组成。图2为系统平面布置,总体布置分隔为南北两个房间,每个房间有上下两层,柱式膜组器及配套设备置于南部上层,下层主要布置管道并连接到北部下层;北部下层主要放置进水泵、反洗泵等设备,上层放置加药

罐及配套泵、空气压缩系统等设备。总占地面积约14 040 m² (180 m \times 78 m),折算单位水量占地面积约0.014 m²/m³。

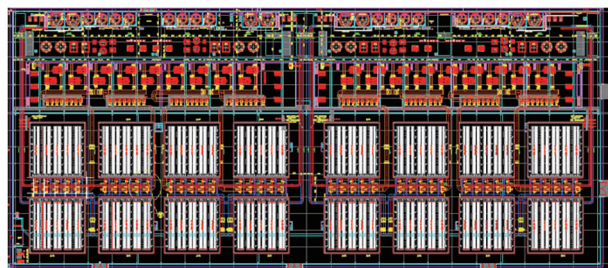


图2 膜车间总平面布置

Fig.2 General layout of ultrafiltration membrane workshop

3.1 进水单元

进水单元由进水集水池、进水泵、自清洗过滤器及相关自动阀门、仪表组成。经过预处理的污水通过进水泵提升至前置自清洗过滤器进行初过滤,同时将聚合氯化铝投加至自清洗过滤器前,在过滤器内充分混合,形成大颗粒,便于膜的截留,过滤器出水经管道送至超滤膜处理单元。进水泵的选型是本项目设计的一个重点,需考虑以下因素:

- ① 满足 100×10^4 m³/d的产水量和1.27的变化系数要求;
- ② 适应膜的阻力变化;
- ③ 运行频率 >30 Hz;
- ④ 在限定空间能够满足安装及日常维护需求;
- ⑤ 有一定备用率。

进水单元主要设备参数见表1。

表1 OWUF膜系统进水单元主要设备

Tab.1 Main equipment for inflow unit of OWUF membrane system

项目	型号	数量/台	备注
进水泵	$Q=2\ 150$ m ³ /h, $H=340$ kPa, $N=250$ kW, 变频	36	32用4备
絮凝剂投加泵	$Q=690$ L/h, $H=0.3$ MPa, 泵头材质PP, $N=0.55$ kW	8	4用4备

3.2 膜过滤单元

膜过滤单元是OWUF膜系统的核心处理单元,采用外置式柱形膜组件,外压错流过滤方式,浓水回流至前端预处理单元。超滤膜组件公称膜孔径约0.02 μm,在目前PVDF超滤/微滤产品中过滤精度最高,能够提供安全可靠的出水水质;具备更低的填

充密度,能够减少积泥;采用独特的均匀直通型布水、布气设计,保证排泥通畅;具有独特的力学结构形式,出水端固定、进水端游动,有利于膜组件长期稳定运行。OWUF 膜组件外型及内部结构如图 3 所示。

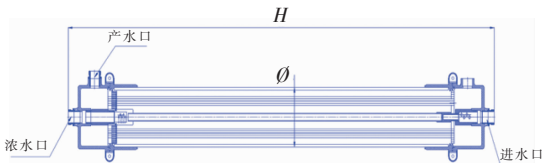


图 3 OWUF 膜组件外型及内部结构
Fig. 3 External and internal structure of OWUF membrane module

在膜过滤单元内,超滤膜组器依据时间或传感器反馈信号完成产水、反洗、气洗、化学清洗、压力检测等各种系统工况的运行操作。如何在有限的膜车间放置膜组器,管道如何排布能够保证足够的维修空间,系列间阀门能否共用,阀门开启时间能否满足需求等均是本工艺段的设计重点。例如,反洗阀管径过大会导致阀门开启时间过长而无法满运行所需要的反应时间,因此采用各系列单独控制以减小反洗阀管径,确保膜组器运行稳定。

高碑店再生水厂 OWUF 系统工艺及膜组器主要参数见表 2。

表 2 OWUF 系统工艺及膜组器技术参数
Tab. 2 Technical parameters of OWUF system and membrane module

项 目	主要参数
膜型号	OWUF - 225(碧水源)
膜材料	PVDF(聚偏氟乙烯)
膜类型	中空纤维超滤膜
过滤类型	外压错流式
水回收率/%	91. 15
名义膜通量/(L · m ⁻² · h ⁻¹)	41. 34
系列数	4
膜组器数量/系列	20
膜组件数量	180 + 4(预留空位)
单支膜组件面积/m ²	70
膜壳材质	UPVC
膜壳设计压力/MPa	1
正常运行时的跨膜压差/kPa	50 ~ 60
过滤时最高跨膜压差/kPa	100
设计 pH 操作范围	2 ~ 10
设计最低进水温度/℃	12

3. 3 反冲洗单元

进水中固体物质积累在膜表面,会逐渐增加跨膜压差(TMP) 值,通过反冲洗可以去除膜表面的固体物质,从而使 TMP 值恢复到前一个产水周期值。OWUF 膜系统反冲洗采用周期性气水反冲洗方式,在产水一定时间后,为弥补膜由于长时间过滤污堵造成的透水性损失,系统周期性地反冲洗,利用压缩空气在水中产生的膜面流动冲刷膜过滤表面,在膜表面产生切向力,以减少或去除膜表面的污染物,提高膜组器膜丝的透水性能,而后排空膜组器以去除积累在膜丝周围的固体物质。在反冲洗过程中不使用化学药剂。一个反冲洗周期为 30 min: 包括 28. 5 min 过滤,0. 5 min 水反洗,0. 5 min 气水反洗,0. 5 min 排污。反洗强度为 70 L/(m² · h) 。

反洗排水构成再生水厂废液的绝大部分,因此水的回收率主要取决于反洗参数。反洗单元主要设备参数见表 3。

表 3 反洗单元主要设备
Tab. 3 Main equipment of membrane backwashing unit

项 目	参 数	数量/台	备注
反洗泵	$Q = 900 \text{ m}^3/\text{h}, H = 290 \text{ kPa}, N = 90 \text{ kW}$, 变频	12	8 用 4 备
反洗排水泵	$Q = 900 \text{ m}^3/\text{h}, H = 270 \text{ kPa}, N = 100 \text{ kW}$	12	8 用 4 备
膜擦洗空压机	$Q = 25. 2 \text{ m}^3/\text{min}, P = 0. 7 \text{ MPa}, N = 132 \text{ kW}$	8	4 用 4 备

3. 4 化学清洗及中和单元

当膜污染到一定程度时,需要采用化学清洗来恢复膜通量。膜的化学清洗有两种方式:

- ① 维护性清洗。此类清洗持续时间较短,采用较低的化学药品浓度,清洗频率较高。其目的在于保持膜的透水性和延长恢复性清洗周期。
- ② 恢复性清洗。此类清洗持续时间比维护性清洗长,采用的化学药品浓度较高,清洗频率较低,其目的在于恢复膜的透水性。当产水过程中 TMP 达到最大允许值时启动恢复性清洗。

膜的化学清洗药品为次氯酸钠和柠檬酸,药品均密封存放在化学储罐内。次氯酸钠主要用于去除有机物和生物污堵,柠檬酸用于去除无机物污堵,若采用次氯酸钠清洗无法将 TMP 恢复到合适的范围,则需要采用柠檬酸清洗。本工程的来水是二级处理污水,通常有机污染比无机污染更为严重。因而,建议在维护性清洗和恢复性清洗时均使用次氯酸钠,

柠檬酸仅用于恢复性清洗。

推荐的清洗参数见表4。

表4 推荐的膜清洗参数

Tab.4 Recommended parameters of membrane washing

项 目	浓度	清洗频率	清洗持续时间/(h·次 ⁻¹)
维护性清洗	次氯酸钠	100 ~ 300 mg/L	1 次/(1 ~ 2) d
恢复性清洗	柠檬酸	1% ~ 2% (质量分数)	12 次/a (视运行情况定)
	次氯酸钠	1 000 ~ 2 000 mg/L	12 次/a

维护清洗和恢复清洗后的清洗液不能直接排放,需经过中和系统处理后再处置。中和系统由中和池和加药泵组成。化学清洗废液定期排放至中和池内,再注入还原剂及碱溶液,使废液与中和药剂反应,反应达到设定值后,通过中和池与反洗排水池中间的连通闸门将中和药液排放至反洗排水池,再通过反洗排水泵排至前端的二沉池。

3.5 压力检测单元

OWUF 膜系统运行一段时间后,需要周期性地对膜组器及膜丝进行压力检测,确定膜丝的完整性,即断丝率;若测定的断丝率在设计值范围内,表明系统运行正常,可以继续产水;若测定值超过设计值,则需要对膜丝进行修补或者返回厂内维修、更换。

4 调试出现的问题及解决措施

100 × 10⁴ m³/d 处理规模决定了系统的复杂性,在设计过程中尽可能考虑了各项因素。但项目建成后在调试运行过程中仍出现一些问题,在采取相应解决措施后,超滤膜系统总体运行稳定。

① 水锤

在调试运行过程中发现因为水锤造成部分管道振动现象,如果不加以控制可能引起水泵反转,破坏泵房内设备,甚至引发更加严重的后果。为避免此类问题发生,采取以下措施进行防范:第一,延长进水泵和反洗泵的停泵时间,更换出口止回阀润滑油,调慢止回阀行程速度;第二,在管道的隆起各处设置自动排气阀;第三,水泵启动前,出口阀门先打开15% ~ 30%,管道上其余阀门全开,启动水泵,待管道充满水后将出口阀门开到所需开度;第四,在反洗时,先开启反洗排水阀,缓慢关闭产水阀,开启反洗进水阀,最后关闭进水阀。采取以上措施后,在系统运行时水锤问题得以避免。

② 管廊支架晃动

在调试运行过程中 OWUF 膜系统管廊上部支架晃动比较厉害,因为总产水管道的机械数量较多,从高处至产水池的管道部分支架数量不足,导致该

管道发生振动和微位移。因此增加了产水管道支架,在每个系列两条产水主管之间增设两处靠背顶托,在走道边设置两处固定龙门架,在地下管廊增设两处高架门字 U 型管卡。每个系列地上管廊板凳支架之间增加 200 mm × 200 mm 的 H 型钢增加连接支撑,上中前后各一处,一共 4 处,这样可以减弱两组总产水管道向中间的应力冲击。

③ 加药装置泄漏

设备间次氯酸钠、柠檬酸、氢氧化钠等加药泵均有不同程度的药液泄漏,接口处有结晶,地面出现漏液堆积腐蚀和固体析出。UPVC 管因接口处粘接不牢固造成渗漏(粘接时为冬季施工,温度较低,粘接效果较差),而且止回阀内部阀板(铜材质)被次氯酸钠腐蚀后粘连在一起,导致无法正常使用。解决措施:在适宜温度下对 UPVC 管重新粘接,防止温度过高或者过低造成粘接不牢,止回阀全部更换为 UPVC 材质。

④ 气擦洗减压阀控制^[1]

调试运行时减压阀主要出现两个问题:第一,调节范围小,太灵敏,微调气量波动很大;第二,调节不稳定,调好的减压阀经过几天运行后气量会产生较大幅度变化。经检测,主要原因是减压阀出口压力太小,因此在减压阀后端软连接处增加一块孔径为 45 mm 的限流板,使出口压力达到 0.3 ~ 0.4 MPa,问题便得以解决。

⑤ 自清洗过滤器及反洗过滤器堵塞^[2]

进水单元自清洗过滤器堵塞频繁报警。经过检查分析,原因是进水水质较差及自清洗过滤器本身清洗不彻底,因此更换新的滤网,改进自清洗程序,并在生物滤池出水增设浊度仪,降低碳源投加量或将碳源投加到生物滤池前段曝气池部分,水质较差时进行溢流或超越,该问题得以解决。

同样在反洗单元反洗过滤器偶尔也会出现堵塞。堵塞主要是因为水厂生物滤池碳源投加量太高,造成微生物滋生、堵塞滤网;另外一个原因是反

洗过滤器出口压力太低,最高只有 0.05 MPa,出口压力至少 0.2 MPa 才能取得较好的清洗效果。因此采取对应的解决措施有:增大反洗水池次氯酸钠投加浓度,减小出口手动蝶阀开度或必要时进行人工离线清洗。

⑥ 冷凝水排放

设计时没有考虑到空压机及汽水分离器产生的冷凝水排放问题,系统前期调试运行过程中冷凝水一直排放到车间地面,影响环境卫生。因此后期增加了专门的排放管道,通过管道直接排放到废水池。

5 OWUF 膜系统性能测试

2017 年 6 月 1 日—2017 年 7 月 2 日每天多个时段依次分别对 OWUF 膜系统 4 个系列进行性能测试。2017 年 6 月 1 日—2017 年 6 月 15 日对一、二系列进行测试,2017 年 6 月 16 日—2017 年 7 月 2 日对三、四系列进行测试,测试结果见表 5。

表 5 OWUF 膜系统性能测试结果

Tab. 5 Test results of OWUF membrane system

项 目	一系 列	二系 列	三系 列	四系 列	平均 值
累计进水量/ 10^4 m^3	402.20	376.50	441.00	438.70	414.60
累计产水量/ 10^4 m^3	368.80	343.00	400.00	396.50	377.08
平均回收率/%	91.71	91.11	90.68	90.39	90.97
平均膜通量/ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	40.65	37.81	44.09	43.71	41.56
平均跨膜压差/kPa	43.90	38.70	38.10	38.80	39.88
吨水耗电量/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.11	0.09	0.10	0.09	0.10
平均出水浊度/NTU	0.17	0.19	0.23	0.21	0.20

OWUF 膜系统性能测试结果显示:4 个系列跨膜压差平均值范围在 38 ~ 44 kPa,低于设计跨膜压差值(50 kPa),平均水回收率为 91.71% ~ 90.39%,高于设计平均回收率(90%);系统膜通量平均值为 $41.56 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,高于设计名义膜通量[$41.34 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$],平均出水浊度为 0.2 NTU,满足高碑店再生水厂改造后出水浊度指标要求。

6 OWUF 膜系统投资及耗电量

高碑店 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 再生水厂改造工程中 OWUF 膜系统总投资约 2 亿元,包括工艺设备、仪表、自控、备品备件费用以及技术服务、调试运行等费用。系统总装机功率约 15.2 MW,运行过程中平均吨水耗电量约 $0.1 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

7 结论

针对 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的处理规模和有限的占地

面积,在高碑店再生水厂升级改造项目中采用碧水源超大型膜组件,单支膜组件面积为 70 m^2 ,单套膜组器由 180 支 + 4 支(空位)膜组件集成,单套设计产水量可达 $12\,500 \text{ m}^3/\text{d}$,是目前国内最大的超滤膜组器之一。在设计过程中,充分考虑了系统复杂性和空间有限性,重点对进水泵和反洗气动阀进行选型比较。针对调试运行过程中出现的水锤、管廊支架晃动等状况采取了相应的解决措施,保证系统能够安全稳定运行。

改造完成后,超滤膜系统性能测试显示:系统水回收率 $\geq 90\%$,处理吨水耗电量约 $0.1 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,平均出水浊度为 0.2 NTU,满足厂区改造出水浊度指标要求。超滤膜系统运行稳定,具有可观的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 肖喆. 中空纤维超滤膜系统切向流与过膜压力控制的研究[J]. 广东化工,2011,38(8):144-145.
Xiao Zhe. The study of tangential flow and TMP control in hollow fiber ultrafiltration system[J]. Guangdong Chemical Industry,2011,38(8):144-145(in Chinese).
- [2] 汪开明,张啟元,冯海波,等. 中空纤维超滤膜系统化学清洗比较研究[J]. 水处理技术,2013,39(7):119-120.
Wang Kaiming, Zhang Qiyuan, Feng Haibo, et al. Comparative study on chemical cleaning of hollow fiber ultrafiltration membrane system[J]. Water Treatment Technology,2013,39(7):119-120(in Chinese).



作者简介:陈翔(1976—),男,广西宜州人,本科,高级工程师,主要从事水处理工艺设计等相关工作。

E-mail: chb-cx@foxmail.com

收稿日期:2018-02-08