

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.053

# 再生水处理工艺 CMF-S 优化运行的中试研究

章丽<sup>1</sup>, 田一梅<sup>1</sup>, 王睿<sup>1</sup>, 姜威<sup>2</sup>, 李育宏<sup>2</sup>, 李殿海<sup>2</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津中水有限公司, 天津 300221)

**摘要:**通过中试试验装置,结合夏季进水水质及高、中、低负荷3种运行工况对浸没式连续微滤(CMF-S)工艺运行参数进行优化研究。结果表明,CMF-S优化运行可减缓膜污染,提高运行效率,降低运行费用;利用运行数据建立跨膜压差TMP增长数学模型,确定主要影响因素,根据不同的工况条件,调控运行参数,实现微滤系统运行优化。

**关键词:**CMF-S; 优化运行; TMP模型

**中图分类号:**TU991 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0233-05

## Pilot Scale Test on Optimal Operation of CMF-S for Reclaimed Water Treatment

Zhang Li<sup>1</sup>, Tian Yimei<sup>1</sup>, Wang Rui<sup>1</sup>, Jiang Wei<sup>2</sup>, Li Yuhong<sup>2</sup>, Li Dianhai<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;

2. Tianjin Reclaimed Water Co. Ltd., Tianjin 300221, P. R. China)

**Abstract:** Combining with influent quality in summer and three loading conditions (low, medium and high), parameter optimization of continuous micro-filtration (CMF-S) is studied through pilot-scale test. Results show that: 1) optimal operation of CMF-S can retard membrane fouling, improve operating efficiency and reduce the costs; 2) according to operation data of the CMF-S system, the mathematical model of  $\Delta$ TMP growth can be obtained, by which we can identify the major influencing factors, and then regulate operating parameters under different conditions to achieve operation optimization of microfiltration system.

**Key words:** CMF-S; optimal operation; TMP model

微滤膜分离技术<sup>[1-2]</sup>已广泛应用于污水再生利用领域<sup>[3-6]</sup>,各国已有不少工程将处理后的再生水回用于工业用水、景观用水、城市杂用水等方面<sup>[7-9]</sup>。在不同进水水质和工艺参数条件下,微滤膜污染<sup>[10-13]</sup>以及运行效率有很大的不同,目前国、内外浸没式连续微滤(CMF-S)系统一般采用膜厂家集成化设计,在针对实际工程中工艺优化运行方面的研究还比较匮乏。

本文结合某再生水厂CMF-S工艺运行情况,通过中试试验研究确定不同工况工艺的最优运行条件,并通过数学模型分析微滤膜工艺运行过程中影响跨膜压差的主要因素,有效优化CMF-S深度处理工艺。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 原水水质

试验地点选在某再生水厂内,原水为水厂预处理工艺的混凝沉淀池出水,即CMF-S工艺进水。原水的COD为10~45 mg/L,平均32.94 mg/L;氨氮为0.25~4.52 mg/L,平均值0.94 mg/L;总氮为9.42~26.09 mg/L,平均值19.52 mg/L;总磷为0.04~8.42 mg/L,平均值2.15 mg/L;色度为10~40度,平均值25度;浊度为0.51~1.40 NTU,平均值

0.84 NTU;pH值在6.65~7.13之间。

### 1.2 试验材料

中试系统采用再生水厂的浸没式微滤膜组件,即Memcor公司生产的S10子膜柱。膜柱的微孔中空纤维膜用塑料保护网包裹,两端用聚氨酯塑料封头,滤后水通过膜组件上端封头从膜内腔流向集水管路,底部用封头封堵纤维膜的出口,但允许低压工艺空气在反洗时从封头上均匀布置的开孔进入膜纤维的外表面。

### 1.3 试验装置

本试验采用恒流过滤,出水流量为1.8~2.8 m<sup>3</sup>/h,膜通量为32.14~50 L/h·m<sup>2</sup>,中试流程及装置如图1所示。

预处理采用混凝沉淀工艺,出水经提升泵提升到高位水箱,重力流入微滤膜分离池,膜出水首先进入微滤反洗罐,当反洗罐水位达到设计水位时,膜出水进入微滤储水罐。系统设有曝气、反洗、化学清洗及自控装置,可实现过滤、气水反冲洗和化学清洗自动控制,出水方式为泵抽吸,通过设置在膜组件出水管路上的负压在线监测装置记录跨膜压差TMP。

### 1.4 试验方案

目前再生水厂CMF-S工艺未满负荷运行,其负荷将随

收稿日期:2012-08-09

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-005-01)

作者简介:章丽(1986-),女,硕士,主要从事城市污水再生利用研究,(E-mail)smartli2005@163.com。

未来用户需水量逐渐增大而上升,参数优化试验考虑在低负荷(1.8 m<sup>3</sup>/h)、中负荷(2.45 m<sup>3</sup>/h)和高负荷(2.8 m<sup>3</sup>/h)3种工况下分别进行。工艺参数过滤周期(A)、单独气洗时间

(B)、气水联合反洗时间(C)作为正交试验<sup>[14]</sup>的影响因素,结合水厂的微滤工艺设计参数和运行要求,每个因素选择3个水平,见表1。

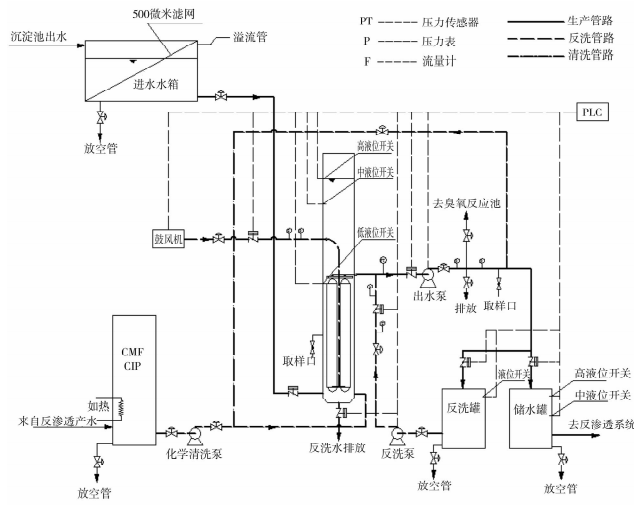


图 1 浸没式连续微滤工艺流程及装置图

表 1 正交试验因素水平表

水平	因素		
	过滤周期 A/min	单独气洗 时间 B/s	气水联合 反洗时间 C/s
1	30	20	10
2	40	30	15
3	50	40	20

3种工况分别进行9组试验,每组试验重复2次,将气水反洗前后的跨膜压差TMP恢复率作评价指标。利用Excel软件的函数计算功能,采用L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)留空列、二重复正交试验数据分析方法<sup>[15]</sup>。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 运行参数优化试验

2.1.1 处理效果分析 试验过程中连续监测各个指标的去除情况,结果表明系统运行稳定。

#### 1) 浊度和色度

CMF-S对浊度和色度的去除效果见图2。进水浊度在很大范围内波动,但出水始终保持在0.5NTU左右;进水色度平均25.6度,出水22.7度,去除率为11.15%。

#### 2) 细菌和大肠菌群

CMF-S工艺对细菌和大肠杆菌可以保持很高的去除率,出水无检出。

#### 3) 污染指数SDI

对部分出水的污染指数SDI值进行监测,微滤出水污染指数除个别值略高于3以外,其他都满足后续反渗透工艺进水SDI值小于3的要求。

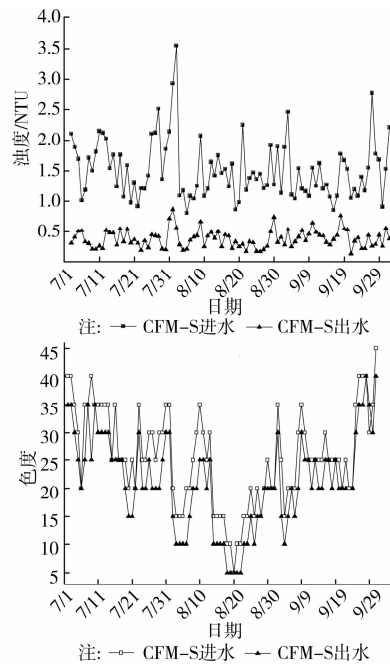


图 2 CMF-S对浊度和色度的去除效果

2.1.2 优化试验结果分析 经验证,利用SPSS方差分析和多重比较结果与该方法建立的L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验数据处理结果完全相同,说明该数据处理分析结果完全可以信赖<sup>[6]</sup>。试验结果分析如表2。

#### 1) 低负荷工况

由表2可见,低负荷工况最佳运行参数为:过滤周期40 min,气水反冲洗单独气洗40 s,气水联合反洗10 s。将最佳运行参数与原工艺运行参数(过滤周期30 min,单独气洗30 s,气水联合反洗15 s)进行对比,结果如表3所示。

表 2 正交试验分析结果汇总

试验因素影响极差排序									
工况	低负荷			中负荷			满负荷		
排序结果	A	C	B	B	C	A	B	C	A
极差分析	0.044 9	0.042 6	0.032 6	0.008 3	0.003 8	0.003 2	0.029 7	0.006 8	0.004 4
因素水平均值排序									
A 排序/min	A2(40)	A1(30)	A3(50)	A2(40)	A3(50)	A1(30)	A2(40)	A3(50)	A1(30)
均值	0.8783	0.8628	0.8334	0.3368	0.3295	0.3186	0.3552	0.3407	0.3089
B 排序/s	B3(40)	B2(30)	B1(20)	B3(40)	B2(30)	B1(20)	B3(40)	B1(20)	B2(30)
均值	0.8792	0.8487	0.8466	0.3338	0.3304	0.3207	0.3523	0.3472	0.3054
C 排序/s	C1(10)	C2(15)	C3(20)	C1(10)	C3(20)	C2(15)	C2(15)	C3(20)	C1(10)
均值	0.8782	0.8607	0.8356	0.3311	0.3269	0.3269	0.3401	0.3330	0.3318
因素与水平的优化结果									
优化组合	A2(40)	B3(40)	C1(10)	A2(40)	B3(40)	C1(10)	A2(40)	B3(40)	C2(15)

表 3 低负荷最佳运行参数与原工艺运行参数对比结果

试验参数及结果	过滤周期/Min	单独气洗时间/s	气水联合反洗时间/s	跨膜压差恢复率 $\eta/\%$	膜污染速率 $\delta/(kPa \cdot s^{-1})$
最佳运行参数	40	40	10	72.83	0.002 96
原工艺运行参数	30	30	15	71.88	0.004 10

从上表可看出,最佳运行参数的跨膜压差恢复率相对原工艺运行参数有所提高,而膜污染速率降低。这说明水厂运行参数存在可优化空间,对参数加以优化调整,可提高工艺

运行效率。从产水率和运行费用对两种运行参数进行比较(其中气水反洗过程中的加氯量按 4 L/次计),结果如表 4 所示。

表 4 2 种运行参数的产水率和运行费用比较结果

对比项目	气洗费用/(元 · d <sup>-1</sup> )	水洗费用/(元 · d <sup>-1</sup> )	药剂费用/(元 · d <sup>-1</sup> )	费用合计/(元 · d <sup>-1</sup> )	产水率/%
最佳运行参数	14.15	4.25	142.08	160.48	92.16
原工艺运行参数	16.88	8.44	166.92	192.24	89.91

最佳运行参数的反洗及药剂总费用相对原工艺降低了 16.52%,产水率提高了 2.5%。

2) 中负荷工况

由表 2 可见,中负荷工况的最佳运行参数为:过滤周期

40 min,气水反冲洗中单独气洗 40 s,气水联合反洗 10 s。将最佳运行参数与原工艺运行参数进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 中负荷最佳运行参数与原工艺运行参数对比结果

试验参数及结果	过滤周期/min	单独气洗时间/s	气水联合反洗时间/s	跨膜压差恢复率 $\eta/\%$	跨膜压差增长速率 $\delta/(kPa \cdot s^{-1})$
最佳运行参数	40	40	10	35.64	0.003 33
原工艺运行参数	30	30	15	33.06	0.003 48

最佳运行参数的跨膜压差恢复率提高 7.8%,膜污染速率降低 4.31%。中负荷工况的最佳运行参数与低负荷工况最佳运行参数相同,反洗及药剂总费用相对原工艺降低,产水率提高,对水厂微滤工艺运行参数加以优化调整,可提高工艺运行效率,节省运行费用。

3) 高负荷工况

由表 2 可见,满负荷工况的最佳运行参数为:过滤周期 40 min,气水反冲洗中单独气洗 40 s,气水联合反洗 15 s。将最佳运行参数与原工艺运行参数进行对比,结果如表 7 所示。

表 7 高负荷最佳运行参数与原工艺运行参数对比结果

试验参数及结果	过滤周期/min	单独气洗时间/s	气水联合反洗时间/s	跨膜压差恢复率 $\eta/\%$	跨膜压差增长速率 $\delta/(kPa \cdot s^{-1})$
最佳运行参数	40	40	15	31.79	0.003 147
原工艺运行参数	30	30	15	29.68	0.003 541

从表 7 可看出,最佳运行参数的跨膜压差恢复率相对原工艺运行参数提高 7.11%,膜污染速率降低 11.13%,同样从

产水率和运行费用两个方面对两种运行参数进行比较,结果如表 8 所示。

表 8 高负荷两种运行参数的产水率和运行费用比较结果

对比项目	气洗费用/(元·d <sup>-1</sup> )	水洗费用/(元·d <sup>-1</sup> )	药剂费用/(元·d <sup>-1</sup> )	费用合计/(元·d <sup>-1</sup> )	产水率/%
最佳运行参数	17.00	6.38	163.52	186.90	95.87
原工艺运行参数	16.88	8.44	190.77	216.09	94.53

从表 8 的比较结果可以看出,最佳运行参数的气洗费用增大,但水洗及药剂费用降低的幅度较大,产水率提高,对高负荷工况的运行参数按照优化结果加以调整,能够使得工艺更加经济高效地运行。

## 2.2 膜污染影响因素分析

工艺运行工况改变时,可以通过调整运行参数来减缓膜污染,提高运行效率。但在一种工况不同运行时段,进出水水质的变化波动也会影响膜污染趋势和运行效果,因此根据工艺的日常运行数据建立 TMP 与主要影响因素之间的数学关系模型,确定影响 TMP 的主要因素及其影响大小,能为日常工艺的运行优化,更好的控制膜污染提供一定的理论指导。

以低负荷工况为例,连续记录 22 d,CMF-S 运行过程中的跨膜压差 TMP(kPa)、阻力 R、每天连续运行时间 T(h),并连续监测膜池内水温、进出水 pH、进出水浊度、进出水色度、进出水总磷以及进水 COD 值。

### 1) 膜污染主要影响因素分析

跨膜压差 TMP 与过滤阻力 R 是表征微滤膜运行过程中膜污染程度的两个参数。阻力 R 中包括 TMP 的影响,还反映了过滤流量和水温变化的影响,可通过平均过滤流量和平均 TMP 及水温计算得到。

此次分析考虑的参数包括了膜池内水温,微滤出水流量

基本保持不变,TMP 和 R 值的相关度为 93%,故选择 TMP 为模型因变量。通过 TMP 与连续过滤时间、进水温度、进出水 pH、进出水浊度、色度、总磷以及进水 COD 的相关性分析,确定影响 TMP 的主要因素为运行时间、温度、进出水浊度之差和进出水总磷值。

### 2) 数学模型建立

上述确定的跨膜压差  $\Delta$ TMP(以增量表示)与连续过滤时间、温度、进出水浊度之差、进出水总磷数据通过多元线性回归分析,得到  $\Delta$ TMP 多元线性回归方程:

$$Y = 0.2387 + 0.0385X_1 - 0.0388X_2 + 0.1513X_3 + 1.2959X_4 - 0.7487X_5 \quad (1)$$

式中:Y 为跨膜压差  $\Delta$ TMP 增量,kPa;  $X_1$  为连续运行时间,h;  $X_2$  为温度,°C;  $X_3$  为进出水浊度之差,NTU;  $X_4$  为进水总磷,mg/L;  $X_5$  为出水总磷,mg/L。

线性回归分析结果中的判定系数为 99.3%,表明在跨膜压差增量  $\Delta$ TMP 的变动中,有 99.3% 可由运行时间、温度、进出水浊度之差、进水总磷、出水总磷这 5 个因素的变动来解释,0.7% 是由其他因素或随机误差引起。将 22 组数据代入式(1)中得到的  $\Delta$ TMP 拟合值和实际记录值以及相对误差分析见表 9。

表 9 TMP 增量预测值和实际记录值比较

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
实际 $\Delta$ TMP/kPa	0.40	1.40	0.70	0.50	1.00	0.70	1.60	0.20	0.50	0.70	0.50
拟合 $\Delta$ TMP/kPa	0.38	1.38	0.74	0.51	1.02	0.73	1.56	0.19	0.49	0.65	0.49
相对误差/%	5.40	1.37	5.52	2.53	2.02	4.68	2.48	2.14	2.49	7.45	1.92
序号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
实际 $\Delta$ TMP/kPa	0.45	0.60	1.20	0.50	0.55	0.70	0.40	0.75	0.25	0.30	0.70
拟合 $\Delta$ TMP/kPa	0.45	0.56	1.26	0.54	0.53	0.70	0.39	0.72	0.27	0.32	0.69
相对误差/%	0.75	5.92	5.36	7.21	4.03	0.52	3.58	3.49	7.94	5.45	1.25

从表中可以看出,采用多元线性回归建立的数学模型拟合效果较好, $\Delta$ TMP 拟合值和实际值相对误差为 0.52%~7.94%,其中相对误差 < 5% 的数据所占比例 68.2%。

根据该模型中 TMP 变化量与不同水质参数之间的关系,对预处理工艺参数及加药量参数加以优化调整,综合考虑微滤膜的运行效率、寿命、经济效益等因素将 TMP 增长率控制在合理的范围。

## 3 结 论

1) 夏季对浸没式连续微滤中试系统进行参数优化试验

结果为:对低负荷、中负荷、高负荷运行工况的运行参数加以优化调整后,能降低膜污染速率,提高反洗效率和微滤工艺运行效率,节省运行费用。

2) 根据相关性分析确定微滤工艺中影响跨膜压差 TMP 主要因素为连续过滤时间、温度、进出水浊度、进出水总磷,通过多元线性回归分析得出关于以上影响因素的拟合精度较高的  $\Delta$ TMP 多元线性回归模型,利用该模型,根据不同工况条件,调节加药量及预处理工艺运行参数控制微滤进水质,并结合微滤运行参数的调控,实现预处理-微滤系统运行优化,为水厂预处理-微滤工艺整体经济高效运行,提供理论

支持和指导作用。

#### 参考文献:

- [1] 陈超宇. 印染废水双膜法(CMF-RO)深度处理及回用研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
- [2] 简武, 冯玮隼, 沈玲玲. 膜分离技术在水处理中的研究及应用进展[J]. 绿色科技, 2012, (3): 163-166.  
Jian W, Feng W J, Shen L L. Theoretical and Applied Research of Membrane Separation Technique in Water Treatment [J]. Journal of Green Science and Technology, 2012, (3): 163-166.
- [3] 张宽. 浅析中水回用[C]//华北地区给水排水技术信息网年会论文集. 天津: [出版者不详], 2010: 906-910.
- [4] Cazorra T. Water reuse of south Barcelona's wastewater reclamation plant[J]. Desalination, 2008, 218(1/2/3): 43-51.
- [5] Ammary B Y. Wastewater reuse in Jordan: Present status and future plans[J]. Desalination, 2007, 211(1/2/3): 164-176.
- [6] Miller G W. Integrated concepts in water reuse: managing global water needs[J]. Water Reuse Association, 2006, 187(1/2/3): 65-75.
- [7] Randles N. Large scale operating experience in membrane systems for water and waste water reclamation [J]. Desalination, 1996, 108(1/2/3): 205-211.
- [8] Chakravorty B, Layson A. Ideal feed pretreatment for reverse osmosis by continuous microfiltration[J]. Desalination, 1997, 110(1/2): 143-150.
- [9] Wintgens T, Melin T, Schafer A, et al. The role of membrane process in municipal[J]. Desalination, 2005, 178(1/2/3): 1-11.
- [10] 刘锋刚, 胡保安, 何文杰, 等. 微滤膜法饮用水处理工艺中膜污染控制的研究[J]. 给水排水, 2007, 33(11): 16-20.  
Liu F G, Hu B A, He W J, et al. Study on fouling control in microfiltration for drinking water treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(11): 16-20.
- [11] 齐鲁. 浸没式超滤膜处理地表水的性能及膜污染控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [12] Wang F L, Tarabara V V. Pore blocking mechanisms during early stages of membrane fouling by colloids[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 328(2): 464-469.
- [13] 玉晓龙. 连续微滤的膜污染及对策[J]. 商品与质量: 学术观察, 2011(6): 370.  
Yu X L. The pilot studies of submerged continuous microfiltration for municipal wastewater treatment [J]. Membrane Science and Technology, 2011(6): 370.
- [14] 单达聪, 耿爱莲. L9(3<sup>4</sup>)正交试验数据 Excel 自动分析模板的建立和应用[J]. 饲料工业, 2011, 32(1): 24-27.  
Shan D C, Geng A L. The establishment and application of excel automatically analyze template on basis of L9 (3<sup>4</sup>) orthogonal test data [J]. Feed Industry, 2011, 32(1): 24-27.
- [15] Chen J P, Kim S L, Ting Y P. Optimization of membrane physical and chemical cleaning by a statistically designed approach [J]. Journal of Membrane Science, 2003, 219(1-2): 27-45.

(编辑 胡志平)

(上接第 218 页)

- [16] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.  
Liu X L, Wang H T, Chen J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database of fundamental industries [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [17] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14064-1:2006, Greenhouse gases - Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. [S]. Geneva: ISO, 2006.
- [18] 亿科环境科技有限公司. CLCD 数据库的单元过程与产品清单 [EB/OL]. (2013-07-06)[2013-04-08]. <http://www.itke.com.cn/blog/downloads?did=26>.
- [19] Swiss centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent database [EB/OL]. Swiss: Swiss centre for Life Cycle Inventories. (2012-07-25)[2013-04-06]. <http://www.ecoinvent.ch>.
- [20] 黄娜, 王洪涛, 范辞冬等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报. 2012, 32(6): 1529-1536.  
Huang N, Wang H T, Fan C D, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainly and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(6): 1529-1536.

(编辑 詹燕平)