

# MVR 蒸发技术在废水处理中的应用研究

田 玲

(中国纺织科学研究院有限公司,生物源纤维制造技术国家重点实验室,北京 100025)

**[摘要]** 随着环境污染和水资源短缺的加剧,对于工业废水的排放要求日趋严格,常规的废水处理技术已无法满足废水的处理要求,尤其是高含盐、高有机物、高毒性的难降解废水,其有效处理仍然是难点。为满足国内对高浓度废水的处理要求,采用 MVR 蒸发技术,通过卧式降膜蒸发装置,分别对高盐废水、焦化废水 RO 浓缩液和垃圾渗滤液 NF 浓缩液进行中试处理。结果表明,该技术可对上述废水进行 10~20 倍的有效浓缩处理,减量化效果明显,且蒸馏水出水水质良好,可满足排放或回用的要求。废水处理产出 1 t 蒸馏水的最高电耗为 25.1 kW·h,电价按 0.6 元/(kW·h)计,运行成本可控制在 15.1 元以下,与管网式反渗透(STRO)工艺处理焦化废水的运行成本(吨水处理成本为 10.48 元,按最佳水回收率 55% 折算,产水成本为 19.05 元/t)相比,具有一定的节能优势。采用 MVR 卧式降膜蒸发技术作为废水的深度处理技术是可行的,具有广阔的应用前景,值得深入研究和推广。

**[关键词]** 机械蒸汽压缩;卧式降膜蒸发器;废水处理;浓缩

**[中图分类号]** X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)04-0144-05

## Study on the application of MVR evaporation technology in wastewater treatment

TIAN Ling

(State Key Laboratory of Bio-Based Fiber Manufacturing Technology, China Textile Academy, Beijing 100025, China)

**Abstract:** With the aggravation of environmental pollution and water shortage, the requirements for industrial wastewater discharge are becoming more and more strict. The conventional wastewater treatment technology can no longer meet the requirements of wastewater treatment, especially refractory wastewater with high salinity, high organic matter and high toxicity, whose effective treatment is still difficult. In order to meet the domestic treatment requirements for high-concentration wastewater, MVR evaporation technology was adopted to treat high-concentration brine, coking wastewater RO concentrate and waste leachate NF concentrate by horizontal falling-film evaporator in a pilot plant, respectively. The results showed that MVR evaporation technology could effectively concentrate the wastewater by 10-20 times, with obvious reduction effect, and the distilled water quality was good, which met the requirements of discharge or reuse. The electricity consumption per ton of distilled water output was 25.1 kW·h. The electricity price was calculated at 0.6 yuan/(kW·h), and the operation cost could be controlled below 15.1 yuan. Compared with the operating cost of space tube reverse osmosis (STRO) process for treating coking wastewater(cost was 10.48 yuan/t, and the best water recovery rate of 55%, the cost of produced water was 19.05 yuan/t), it had certain energy-saving advantages. The use of MVR horizontal falling-film evaporation technology as advanced treatment technology for wastewater is feasible and has a broad application prospect, which is worthy of in-depth study and promotion.

**Key words:** mechanical vapor recompression; horizontal falling-film evaporator; wastewater treatment; concentration

高含盐、高有机物、高毒性的难降解废水的有效处理是研究的难点。在国外,研究者成功将机械蒸汽压缩(MVR)蒸发技术应用于废水处理,目前已发

展成一项成熟技术<sup>[1]</sup>。国内的 MVR 技术起步较晚,早期以引进国外成套设备为主;随着设备开发和研究的深入,国内企业逐渐掌握该技术,但应用领域多

为化工、食品及海水淡化<sup>[2-3]</sup>。

叶作铝<sup>[4]</sup>报道了韶关冶炼厂采用以预处理软化+MVR降膜蒸发器蒸发+强制循环蒸发结晶+离心干燥包装工艺为主体的工艺处理冶金废水,实现了废水零排放。王明波等<sup>[5]</sup>将电渗析+MVR组合工艺成功应用于制药企业的高盐废水处理中,实现高盐高氨氮废水的资源化。徐超等<sup>[6]</sup>设计SWRO+MVR工艺处理净水厂浓盐水,并完成零排放设计工程化。区藏器等<sup>[7-9]</sup>对MVR蒸发技术处理垃圾渗滤液的工程应用进行研究。目前,MVR蒸发技术在废水处理中的应用取得一定进展,但在工程实用中仍需要进一步推广及进行技术研发。

笔者采用MVR蒸发技术,利用卧式降膜蒸发装置,分别对高盐废水、焦化废水RO(反渗透)浓缩液

及垃圾渗滤液NF(纳滤)浓缩液进行中试处理,获取相关技术参数,为工程化提供一定设计依据。

## 1 流程及装置

### 1.1 MVR 工艺流程

MVR是通过机械蒸汽压缩机对蒸发器产生的二次蒸汽进行压缩,使蒸汽的压力和温度得到提升,并作为补充或加热蒸汽再次送入蒸发器内的工艺。此模式能够充分利用二次蒸汽的潜热,最大限度地减少蒸发过程的能耗。相比于其他技术,MVR具有能耗低、效率高、产水水质好等特点<sup>[10-11]</sup>,具有一定技术优势。

中试采用MVR工艺对废水进行浓缩处理,具体工艺流程见图1。

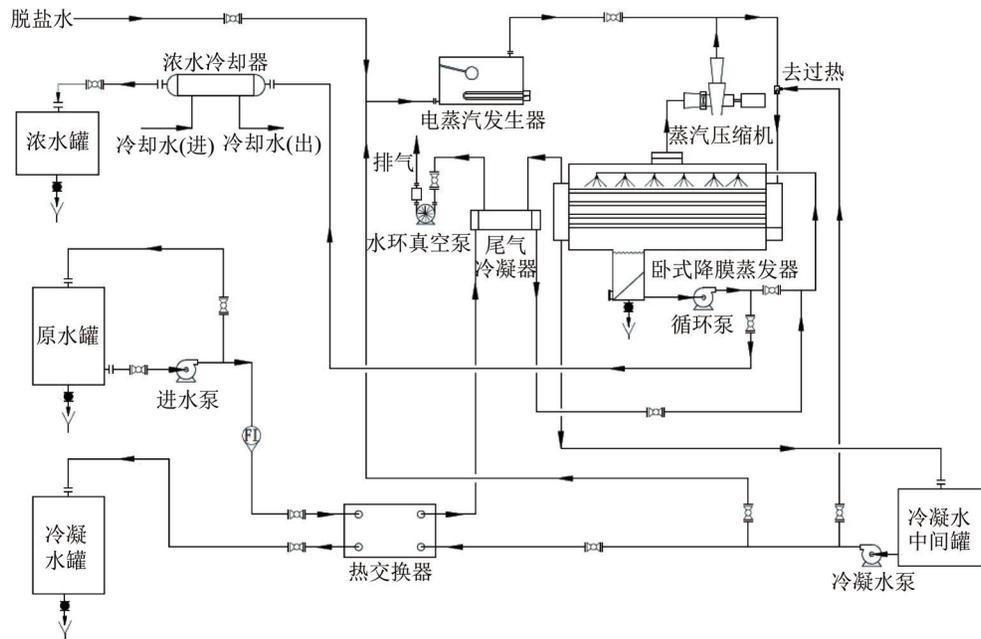


图1 MVR 工艺流程

Fig. 1 Technological process of MVR

原水经过预热进入蒸发器,由循环泵送至喷淋装置在换热管上形成液膜,从上到下均匀落至每层换热管,并与管内经压缩机升温升压的二次蒸汽完成热量交换,浓缩液按设定的浓缩比连续出料。装置运行初期热量由电蒸汽发生器提供,待系统稳定后,无需额外的热源。

### 1.2 装置

装置主要包括原料罐、冷凝水罐、中间罐、预热器、尾气冷凝器、浓水冷却器、进料泵、循环泵、真空泵、冷凝水泵、电蒸汽发生器、卧式降膜蒸发器和蒸

汽压缩机。其核心设备为卧式降膜蒸发器、蒸汽压缩机及循环泵。

#### 1.2.1 卧式降膜蒸发器

卧式降膜蒸发器液体在加热表面分布成膜状形式,不受液体静压和过热区的影响。与立式直管降膜蒸发器及多级闪蒸干燥器相比,卧式降膜蒸发器具有传热系数高、温度损失低、溶液分布均匀、操作稳定性好等优点,可显著降低空间高度,便于组成塔式多效蒸发器,节省液体循环所需能量,并增加了传热有效温差。卧式降膜蒸发器比传统浸没

式蒸发器的传热系数高3~5倍,比垂直管降膜蒸发器高1倍左右<sup>[12-13]</sup>。所选卧式降膜蒸发器处理量为3 t/h。

### 1.2.2 蒸汽压缩机

蒸汽压缩机有罗茨压缩机和离心式压缩机,可根据实际工况选择。中试成套装置采用离心式压缩机,设计温升7℃。

### 1.2.3 循环泵

循环泵采用离心泵,循环比约为7。

## 2 中试部分

### 2.1 水样

选用3种类型废水进行处理,分别为质量分数2.5%的氯化钠溶液模拟高盐废水、焦化废水RO浓缩液和垃圾渗滤液NF浓缩液。焦化废水是一种典型的有毒难降解有机废水,其中的多环芳烃难降解,且通常为强致癌物质,对环境造成严重污染的同时,直接威胁人类健康。焦化废水的处理与回用工艺一般为:调节+隔油+气浮+A/O生物处理+二沉池+混凝沉淀+活性砂过滤器+UF+NF+RO,此次取水为RO的浓缩液。垃圾渗滤液NF浓缩液取自阿苏卫垃圾填埋场,该填埋场垃圾渗滤液处理工艺为调节+厌氧+MBR+NF+RO。焦化废水RO浓缩液和垃圾渗滤液NF浓缩液的水质情况见表1。

### 2.2 试验设计

试验设计见表2。通过控制产品水和浓缩液的比例进行处理,在常压蒸发状态下考察装置运行情况,核算能耗指标,并对原水、产品水和浓缩液进行水质检测。由于焦化废水RO浓缩液和垃圾渗滤液NF浓缩液含盐量低于常规的RO浓缩液,将二者浓缩1倍,使其含盐分别增加到15 420、21 600 mg/L左右后,再进行试验,因此实际浓缩倍数为设计值2倍。

表1 焦化废水RO浓缩液和垃圾渗滤液NF浓缩液水质

Table 1 Quality of coking wastewater and landfill leachate

检测项目	检测结果	
	焦化废水RO浓缩液	垃圾渗滤液NF浓缩液
pH	7.32	8.71
溶解性总固体/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.71×10 <sup>3</sup>	1.08×10 <sup>4</sup>
化学需氧量(COD <sub>Cr</sub> )/(mg·L <sup>-1</sup> )	346	1.00×10 <sup>3</sup>
氨氮(以N计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.41	4.17
钠/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.84×10 <sup>3</sup>	1.82×10 <sup>3</sup>
钾/(mg·L <sup>-1</sup> )	6.4	1.52×10 <sup>3</sup>
钙/(mg·L <sup>-1</sup> )	2.84×10 <sup>3</sup>	77.0
镁/(mg·L <sup>-1</sup> )	4.40	659
钡/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.001)	未检出(<0.001)
锶/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.000 5)	0.95
重碳酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	288	4.57×10 <sup>3</sup>
碳酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	0	456
硫酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	85.3	556
氯化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	4.46×10 <sup>3</sup>	2.60×10 <sup>3</sup>
全硅(以SiO <sub>2</sub> 计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	50.0	17.8

试验过程中水量有限,水样采用循环利用的方式,即蒸馏水和浓缩液都回原水罐,以保持原水浓度不变。

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

项目	高盐废水			焦化废水RO浓缩液			垃圾渗滤液NF浓缩液	
	第1组	第2组	第3组	第1组	第2组	第3组	第1组	第2组
进水量/(L·min <sup>-1</sup> )	33	36.5	34.5	35	34	30	34.5	31
蒸馏水量/(L·min <sup>-1</sup> )	30	30	30	30	30	27.5	30	28
浓缩液量/(L·min <sup>-1</sup> )	3	6.5	4.5	5	4	2.5	4.5	3
浓缩倍数	11	5.6	7.7	7	8.5	12	7.7	10.3

## 3 结果与讨论

对每组设定试验进行采样,水质分析结果见表3。

表3 水质分析结果

Table 3 Analysis of water quality

样品	实验序号	原水		蒸馏水		浓缩液	
		电导率/(mS·cm <sup>-1</sup> )	TDS/(g·L <sup>-1</sup> )	电导率/(μS·cm <sup>-1</sup> )	TDS/(mg·L <sup>-1</sup> )	电导率/(mS·cm <sup>-1</sup> )	TDS/(g·L <sup>-1</sup> )
高盐废水	第1组	30.2	25.3	1.43	0.86	233.2	279.3
	第2组	33.9	30.4	1.53	0.89	159.1	153.1
	第3组	30.7	26.1	2.18	1.25	204.5	194.5
焦化废水RO浓缩液	第1组	13.23	11.11	19.61	11.82	91.76	78.5
	第2组	12.21	10.14	14.78	9.03	84.62	107.7
	第3组	10.18	8.20	9.20	5.54	90.40	120.20
垃圾渗滤液NF浓缩液	第1组	13.55	11.64	45.45	28.52	59.15	66.66
	第2组	12.62	10.79	69.17	42.57	68.55	86.50

表3表明,在高盐废水进水质量分数为2.5%的情况下,采用中试MVR蒸发设备能够实现5.6~11倍的浓缩,即浓缩液中盐的质量分数可达14%~27%;对焦化废水反渗透浓缩液可进行20倍左右的浓缩处理;垃圾渗滤液NF浓缩液的浓缩倍数也可达20倍以上,减量化效果明显。

另外发现,对焦化废水RO浓缩液和垃圾渗滤液NF浓缩液进行预浓缩1倍后,水样TDS并未成倍增加,且随着蒸发过程的进行,原水中的含盐量逐渐减少。在焦化废水RO浓缩液处理试验中,换热管外表面有白色物质富集,根据原水水质,初步推断为氯化钠在换热管外表面出现结晶导致。垃圾渗滤液NF浓缩液含盐10 800 mg/L,其中以碳酸氢根最高,其次为氯离子,钙、镁、碳酸根、硫酸根等的质量浓度分别为77、659、456、556 mg/L,说明垃圾渗滤液NF浓缩液的硬度较高,容易出现结垢现象;试验过程中换热管外壁大约1 h后便可见白色水垢。由于NF浓缩原液中大量硬度物质和易分解物质在蒸发过程中形成水垢从水中析出或分解,造成水样含盐量降低,最终浓缩液含盐量减少到只有NF浓缩原液的40%左右。

取20倍浓缩处理条件下,对焦化废水RO浓缩液和垃圾渗滤液NF浓缩液蒸发产生的蒸馏水分别进行水质检测,结果见表4。

表4 蒸馏水水质  
Table 4 Quality of distilled water

检测项目	检测结果	
	焦化废水蒸馏水	垃圾渗滤液蒸馏水
pH	7.06	7.12
溶解性总固体/(mg·L <sup>-1</sup> )	6.9	60
化学需氧量(COD <sub>Cr</sub> )/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<5)	19.6
氨氮(以N计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.025)	2.7
钠/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.2)	6.3
钾/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.5)	5.1
钙/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.002)	0.24
镁/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.002)	3.56
钡/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.001)	未检出(<0.001)
锶/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.000 5)	未检出(<0.000 5)
重碳酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<2)	32.6
碳酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	0	0
硫酸盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.05)	2.09
氯化物/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.94	8.59
全硅(以SiO <sub>2</sub> 计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	未检出(<0.5)	未检出(<0.5)

由表4可见,MVR系统产生的蒸馏水水质良好,焦化废水蒸馏水中钙、镁、钠、钾、硅、硫酸根、碳酸根、氨氮、COD等指标均低于检测限;垃圾渗滤液NF浓

缩液产生的蒸馏水COD仅为19.6 mg/L,氨氮为2.7 mg/L,盐为60 mg/L,高于GB18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准中COD 50 mg/L、氨氮5 mg/L的排放要求。图2为垃圾渗滤液NF浓缩液蒸发处理效果对比情况。



图2 垃圾渗滤液蒸发处理水样对比

Fig. 2 Comparison of water samples from evaporation treatment of landfill leachate

根据各用电设备功率,计算蒸发吨水的电耗指标,MVR蒸发系统电耗分析见表5。

表5 MVR蒸发系统电耗

Table 5 Electricity consumption of MVR evaporation system

项目	高盐废水			焦化废水RO浓缩液			垃圾渗滤液NF浓缩液	
	第1组	第2组	第3组	第1组	第2组	第3组	第1组	第2组
产水量/(t·h <sup>-1</sup> )	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.65	1.8	1.68
压缩机/kW	32.7	32.3	32.1	31.9	36.4	35.8	33.57	33.57
电加热器/kW	4	4	4	4	4	4	4	4
进水泵/kW	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
循环泵/kW	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
蒸馏水泵/kW	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
吨水电耗/(kW·h)	21.3	21.1	20.9	20.8	23.3	25.1	21.8	23.3

当废水浓缩倍数为20倍的情况下,焦化废水吨水用电最高为25.1 kW·h。若电价按0.6元/(kW·h)计算,每产出1 t蒸馏水的运行成本可控制在15.1元以下,与文献[14]报道的管式反渗透膜(STRO)工艺处理焦化废水运行成本(吨水处理成本10.48元,按最佳水回收率55%折算,产水成本19.05元/t)相比,具有一定节能优势。

#### 4 结论

对高盐废水、焦化废水RO浓缩液及垃圾渗滤液NF浓缩液进行处理并分析,可知MVR蒸发技术对以上废水能进行10~20倍浓缩,减量化效果明显;

蒸馏水出水水质良好,满足排放或回用要求;另外系统每蒸出1 t 蒸馏水的能耗在20.8~25.1 kW·h,相较于STRO处理工艺处理成本更低,因此采用MVR卧式降膜蒸发技术作为废水的深度处理技术是可行的。该技术应用灵活、耗能低,针对不同的处理要求,既可单独作为处理单元完成废水的减量处理,又可与其他技术相配合处理高难废水,值得深入研究和推广应用。如零排放工艺可将预处理、MVR蒸发、结晶及干燥等多处理单元进行组合,最终实现水资源和固体物质的回收利用。

在高含盐、高COD废水的处理过程中,会出现泡沫和结垢现象,因此需要完善预处理工艺,通过沉淀法去除废水中易结垢物质,并投加有效的消泡剂、阻垢剂等,保证蒸发系统长期稳定地运行。另外在工程化应用中,还需根据处理介质的性质,对工艺参数、设备材质和结构进行设计优化,以提高系统效率,减少设备投资,降低运行成本。

#### 参考文献

- [1] 李晓鹏. MVR工业废水处理设备升膜蒸发器研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.  
LI Xiaopeng. The research of MVR climbing film evaporator in industrial wastewater treatment equipment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [2] 丁秀华. MVR技术的工业应用及发展[J]. 广州化工, 2015, 43(9): 41-42.  
DING Xiuhua. Industrial application and development of mechanical vapor recompression technology[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(9): 41-42.
- [3] 苗纯正, 朱小飞, 唐慧波, 等. MVR技术在海水淡化中的应用研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(3): 165-168.  
MIAO Chunzheng, ZHU Xiaofei, TANG Huibo, et al. Application research of MVR technology in seawater desalination[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(3): 165-168.
- [4] 叶作铝. MVR蒸发技术在冶金工业废水零排放中的应用[J]. 世界有色金属, 2018, 33(23): 16-18.  
YE Zuolv. MVR used in metallurgy zero discharge of industrial wastewater[J]. World Nonferrous Metals, 2018, 33(23): 16-18.
- [5] 王明波, 于凯, 刘国新, 等. 电渗析+MVR组合技术处理高盐度高氨氮废水工程实例[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(5): 158-160.  
WANG Mingbo, YU Kai, LIU Guoxin, et al. Engineering example of treatment of high salinity and high ammonia wastewater by electro-dialysis + MVR combined technology[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(5): 158-160.
- [6] 徐超, 丁宁, 栗文明. SWRO+MVR工艺处理净水厂浓盐水零排放工程设计[J]. 工业水处理, 2020, 40(9): 112-115.  
XU Chao, DING Ning, LI Wenming. A combined process of SWRO and MVR design for zero-discharge project for concentrated water of a water purification plant[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(9): 112-115.
- [7] 区藏器, 李穗中. MVR处理垃圾填埋渗滤液的合理途径[J]. 广州环境科学, 2011, 26(1): 17-22.  
QU Zangqi, LI Suizhong. The reasonable ways in the treatment of solid waste landfill leachate by MVR[J]. Guangzhou Environmental Science, 2011, 26(1): 17-22.
- [8] 张琳. MVR技术 in 生活垃圾填埋场渗滤液处理工程中的应用: 以黄竹坑生活垃圾填埋场为例[J]. 中国建设信息化, 2021(22): 72-73.  
ZHANG Lin. Application of MVR technology in landfill leachate treatment project: take huangzhukeng domestic waste landfill as an example[J]. Informatization of China Construction, 2021(22): 72-73.
- [9] 朱玉修. 负压MVR技术在垃圾填埋场浓缩液处理工程中的应用[J]. 化工管理, 2022(2): 56-59.  
ZHU Yuxiu. Application of negative pressure MVR technology in concentrated liquid treatment project of landfill[J]. Chemical Management, 2022(2): 56-59.
- [10] 方健才. MVR蒸发工艺在氯化铵废水处理中的应用及经济分析[J]. 广东化工, 2012, 39(8): 102.  
FANG Jiancai. Application and economic analysis of  $\text{NH}_4\text{Cl}$  wastewater treatment by MVR evaporation craft[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(8): 102.
- [11] 李志新, 王亚雄. 三效MVR与三效蒸发技术的能耗对比分析[J]. 节能技术, 2019, 37(3): 244-247.  
LI Zhixin, WANG Yaxiong. Contrastive analysis on energy consumption in three-effect MVR and three-effect evaporation technology[J]. Energy Conservation Technology, 2019, 37(3): 244-247.
- [12] 吴金星, 董其伍, 刘敏珊, 等. 板式降膜蒸发器结构及性能研究[J]. 郑州工业大学学报, 1997, 18(4): 7-12.  
WU Jinxing, DONG Qiwu, LIU Minshan, et al. The study on structure and characteristics of the shell-plate falling film evaporator[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1997, 18(4): 7-12.
- [13] YUNDT B, RHINESMITH R. Horizontal spray-film evaporation[J]. Chemical Engineering Progress, 1981, 77(9): 69-73.
- [14] 申亮杰, 梁勇, 张志远, 等. STRO膜处理焦化废水膜浓缩液的中试研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(8): 118-121.  
SHEN Liangjie, LIANG Yong, ZHANG Zhiyuan, et al. A pilot-scale treatment on membrane concentrated solution from coking wastewater by STRO membrane[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(8): 118-121.

[作者简介] 田玲(1982—), 硕士研究生, 高级工程师。E-mail: yuandian988@163.com。

[收稿日期] 2023-02-19(修改稿)