

试验研究

# 真空膜蒸馏处理循环冷却水的试验研究

李福勤, 文晓翠, 王瑶, 安晓婵

(河北工程大学 城市建设学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 基于提高循环冷却水的处理效率, 并探寻新的电去离子预处理工艺, 利用自制中空纤维膜组件, 考察了真空膜蒸馏过程参数对产水水质的影响。结果表明, 在试验范围内, 料液流量(7.21~18.98 L/h)、热侧温度(52℃~73℃)、冷侧真空度(0.055~0.087 MPa)对产水水质影响不大, 电导率在 5 μS/cm 以下, 总硬度小于 1 mg/L(以 CaCO<sub>3</sub> 计), UV<sub>254</sub> 在 0.02~0.04 之间, TOC 在 0.05~0.5 mg/L 之间, 去除率分别达到 99.8%、99.85%、93.71%、99.65%, 可以达到电去离子的进水水质要求; 预软化可以提高出水水质; 浓缩倍数增大到 20 倍, 电导率由 1.72 μS/cm 上升到 3.73 μS/cm, Ca<sup>2+</sup>浓度、UV<sub>254</sub>、TOC 等指标变化不大, 采用真空膜蒸馏可望实现循环冷却水的零排放。

**关键字:** 真空膜蒸馏; 循环冷却水; 出水水质; 电去离子

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2013)02-0019-03

## RESEARCH ON VACUUM MEMBRANE DISTILLATION FOR CIRCULATING COOLING WATER

LI Fu-qin, WEN Xiao-cui, WANG Yao, AN Xiao-chan

(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** With the purpose of improving the recovery of circulating cooling water, in this paper, vacuum membrane distillation (VMD) experiments were carried out with homemade hollow fiber membrane module. The influences of operation parameters on the effluent water quality were investigated, at the same time to search a new pretreatment technology electricity for electrodeionization (EDI). The results showed that in the test range, flow (7.21~18.98 L/h), temperature in the hot side (52℃~73℃) and vacuum of the cold side (0.055~0.087 MPa) have little effect on the effluent water quality, the conductivity of output water is lower than 5 μS/cm, total hardness remains less than 1 mg/L, UV<sub>254</sub> is between 0.02~0.04, TOC remains between 0.05~0.5 mg/L, the removal rate achieved 99.8%, 99.85%, 93.71%, 99.65% respectively which can meet the requirement for EDI's feed water quality; pre-softening can improve the effluent water's quality; when the circulating cooling water was concentrated 20 times, the conductivity just increase from 1.72 μS/cm to 3.73 μS/cm, and other indexes such as Ca<sup>2+</sup>, UV<sub>254</sub>, TOC changed little, so using vacuum membrane distillation may make zero release of circulating

cooling water come true.

**Keywords:** VMD; Circulating; cooling water; Effluent water quality; electrodeionization

收稿日期: 2012-11-24

基金项目: 2011 河北省科技发展计划项目新型膜材料和膜蒸馏组件的制备及其应用研究 (11215116D)

第一作者简介: 李福勤 (1966-), 男, 山西临县, 毕业于中国矿业大学 (北京), 教授, 博士, 研究方向为水污染控制工程及资源化、膜法水处理技术。

在电力(热电)、钢铁、化工等行业生产中需要大量循环冷却水<sup>[1]</sup>,循环冷却排污水具有含盐量高,污染强度大的特点,处理较困难。由于水资源短缺,污水回用已经成为一种缓解水危机的有效途径,针对循环冷却排污水的处理,目前常用的方法是混凝-沉淀-过滤去除胶体和悬浮物质,然后采用反渗透进行除盐,但是反渗透的回收率一般在75%左右,还有25%的浓水需排放,再次产生高盐废水污染的问题<sup>[2]</sup>。

膜蒸馏技术是一种新型膜分离技术,与反渗透工艺相比,膜蒸馏具有设备简单、操作方便、不需要高压、应用范围广的优点,可用于浓缩、分离、结晶等<sup>[3-6]</sup>方面,理论上膜蒸馏除盐的产水率可以达到100%,使零排放成为可能。目前对于真空膜蒸馏的研究主要集中在膜通量和脱盐率方面,而少对其他的水质指标的关注<sup>[7-9]</sup>,明确其他出水指标,如硬度、TOC、UV<sub>254</sub>、pH值等,对进一步提高真空膜蒸馏出水水质的后续工艺有很重要的指导意义,通过处理某热电厂的循环冷却排污水,考察真空膜蒸馏的运行参数(热侧温度、料液流量、冷侧真空度)、进水水质和浓缩倍数对出水水质的影响,同时考察其出水水质是否能达到EDI的进水要求,为将其作为EDI的预处理工艺提供依据。

## 1 试验部分

### 1.1 试验仪器及材料

所用中空纤维膜组件单膜内径0.8 mm,有效长度23 cm,平均孔径为0.18 μm,孔隙率85%,有效膜面积约0.057 m<sup>2</sup>。

所用主要仪器有HSJ-3F型实验室pH计(上海雷磁)、DDS-307A型电导率仪(上海雷磁)、UV1102单光束紫外可见分光光度计(上海天美)、TOC分析仪(日本岛津)、2011N浊度仪(美国哈希)等。

循环冷却水水质见表1。

表1 循环冷却水水质

| 项目 | 电导率<br>(μS/cm) | 总硬度<br>(mg/L) | COD <sub>Mn</sub><br>(mg/L) | UV <sub>254</sub> | pH   | 浊度<br>(NTU) | TOC<br>(mg/L) |
|----|----------------|---------------|-----------------------------|-------------------|------|-------------|---------------|
| 指标 | 2520           | 1370          | 7.75                        | 0.318             | 5.78 | 0.82        | 14.47         |

### 1.2 试验装置及运行

试验所用真空膜蒸馏系统见图1所示,其主

要组成部分为由热侧回路、冷侧回路、PVDF中空纤维膜组件及连接管路。热侧回路包括了恒温水浴锅、蠕动泵,冷侧回路有冷凝管、产水收集器。试验过程中,首先将循环冷却水加热到指定温度,然后打开热侧循环泵及冷侧真空泵,调节流量到预定值,待系统稳定后,开始计时并用产水收集器收集产水。试验采用间歇运行方式,通过变换参数来考察热侧料液温度、流量、冷侧真空度、进水水质和浓缩倍数对出水水质的影响,每次运行两个小时,每组参数测定三次取平均值。

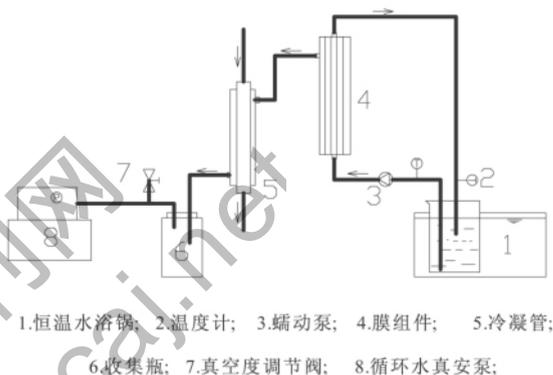


图1 真空膜蒸馏试验装置示意图

### 1.3 监测项目及方法

主要监测电导率、pH值、浊度、硬度、UV<sub>254</sub>、TOC等指标,监测方法参照《水和废水监测分析方法》,同时用量筒测定产水水量,计算膜通量。

### 1.4 EDI进水水质要求

EDI对进水水质要求很高,目前常用两级RO作为预处理,具体值见表2。

表2 EDI模块的进水要求

| 项目 | 电导率/μS/cm | pH      | 硬度/mg/L | TOC/mg/L | 浊度/NTU |
|----|-----------|---------|---------|----------|--------|
| 指标 | ≤30       | 6.0~9.0 | ≤1.0    | ≤0.5     | ≤1.0   |

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行参数对出水水质的影响

在真空度0.087 MPa,热侧温度55℃不变的条件下,考察流量对出水水质的影响,结果如图2所示。

保持流量15.18 L/h和冷侧真空度0.087不变,控制热侧料液温度在不同值,考察热侧料液温度对出水水质的影响,结果如图3所示。

保持热侧料液温度55℃和流量15.18 L/h不变,调节真空值,考察冷侧真空度对出水水质的影响,结果如图4所示。

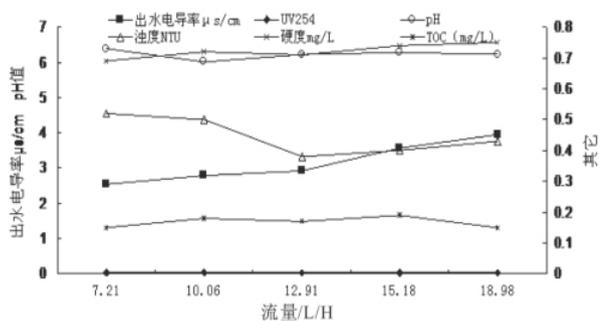


图2 流量与出水水质之间的关系

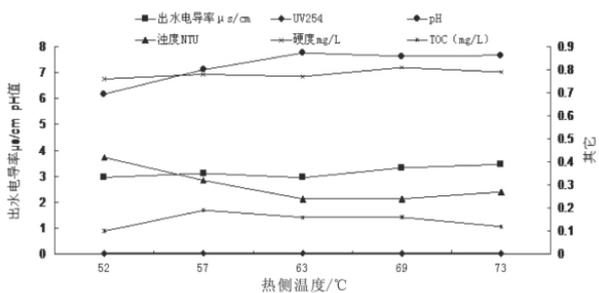


图3 热侧温度与出水水质之间的关系

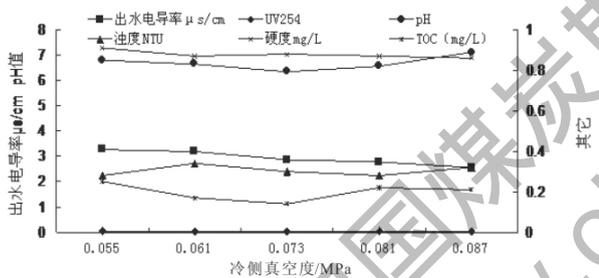


图4 冷侧真空度与出水水质之间的关系

从图2~4中可以看出,在试验范围内,料液流量、热侧温度和冷侧真空度等运行参数对出水水质的影响不大,出水电导率保持在 $5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下,除盐率达到99.8%;pH值与原水相比略有增长;总硬度在 $1\sim 2\ \text{mg}/\text{L}$ 之间,去除率高达99.85%;浊度在 $0.2\sim 0.4\ \text{NTU}$ 之间;UV254含量在 $0.02\sim 0.04$ 之间,TOC在 $0.05\sim 0.5$ 之间,去除率分别达到98.5%、93.71%、99.65%。

## 2.2 预软化对出水水质的影响

用石灰-碳酸钠除硬法对循环冷却排污水进行软化,利用软化后的水进行膜蒸馏试验。进水水质如下:电导率为 $3\ 180\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ,总硬度为 $190\ \text{mg}/\text{L}$ ,UV254为0.214,pH值为11.16,浊度为0.46 NTU,TOC为 $9.235\ \text{mg}/\text{L}$ 。在与原水同样的条件下(冷侧真空度在 $0.087\ \text{MPa}$ ,热侧温度为 $55\ ^\circ\text{C}$ ,流量为 $18.98\ \text{L}/\text{h}$ )进行真空膜蒸馏试验,对比结果如

图5所示。

由图5可以看出对原水经预软化后比原水质

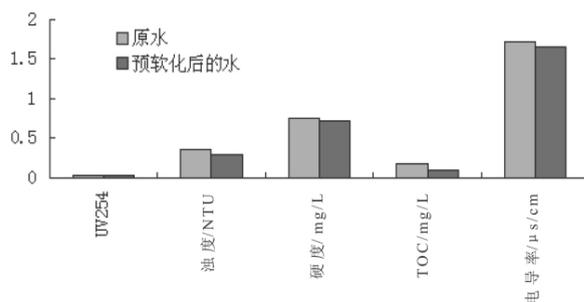


图5 预软化后膜蒸馏产水与原水膜蒸馏产水的水质对比

接用真空膜蒸馏处理出水水质好,特别是硬度和TOC下降较多,为后续深度处理提供了有利条件。

## 2.3 浓缩倍数对出水水质的影响

在冷侧真空度在 $0.084\ \text{MPa}$ ,热侧温度为 $70\ ^\circ\text{C}$ ,流量为 $18.98\ \text{L}/\text{h}$ 的条件下进行真空膜蒸馏试验,监测随着浓缩倍数的增加出水水质的变化,结果见图6。

图6中显示总硬度随浓缩倍数的增大有所波动,但小于 $2\ \text{mg}/\text{L}$ ;出水电导率略有增大,也能保持在 $4\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以内;UV254、浊度、TOC基本不变。

## 3 结论

利用真空膜蒸馏处理某热电厂循环冷却水,在试验范围内,料液流量、热侧温度和冷侧真空度等运行参数对出水水质的影响不大,出水电导率保持在 $5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下,除盐率达到99%以上;pH值与原水相比略有增长;总硬度小于 $1\ \text{mg}/\text{L}$ ,去除率高达99.85%;浊度在 $0.2\sim 0.4\ \text{NTU}$ 之间;UV254含量在 $0.02\sim 0.04$ 之间,TOC在 $0.05\sim 0.5\ \text{mg}/\text{L}$ 之间;对原水预软化后再进行减压膜蒸馏处理可以提高出水水质;随着浓缩倍数(最大到20倍)的增大,出水水质没有受到太大影响,各项指标满足EDI进水水质要求,因此可望采用膜蒸馏技术实现循环冷却水的零排放,并且作为EDI的预处理工艺。

## 参考文献

- [1] 龙荷云.循环冷却水处理[M].第三版.北京:江苏科学技术出版社,2001.
- [2] 李福勤,唐跃刚,何绪文,等.火力电厂循环冷却排水回用处理工艺研究[J].工业水处理,2005,25(11):37~39.

[11]张长飞,葛仕福,赵培涛,等.污泥燃料化技术研究[J].环境工程,2010,28:377~380.

[12]王伟云,李爱民,张晓敏.脱水污泥干燥气化焚烧综合处理工艺[J].化工进展,2010,29:244~247.

[13]张辰.污泥处理处置技术研究进展[M].北京:化学工业出版社,2005:108~112.

[14]梁俊生,杨立新,罗曾凡.污泥热处理灰渣制砖的实验报告[J].广州环境科学,1999,14(2):13~15.

[15]韩莉莉.城市污泥制生态水泥的应用探讨[J].中国给水排水,2011,27(2):107~108.

[16]岳敏,岳钦艳,李仁波,等.城市污水厂污泥制备陶粒滤料及其特性[J].过程工程学报,2008,8(5):972~977.

[17]赵庆良,苗礼娟,胡凯.超声/碱预处理剩余污泥的中温厌氧消化效果[J].中国给水排水,2009,25(15):25~28.

[18]Bipro R D,George N, Madhumita B R. Techno-economic evaluation of ultrasound and thermal pretreatments for enhanced anaerobic digestion of municipal waste activated sludge [J] Waste Management 2012,32:542~549.

[19]Ahnk H, Park K Y, Maeng S K, et al. Ozonation of wastewater sludge for reduction and recycling [J] Water Science and Technology 2002,46(10):71~77.

[20]方平,岑超平,陈定胜,等.用污水处理厂脱水污泥制备含炭吸附剂[J].化工环保,2008,28(3):278~281.

[21]余兰兰,郑凯,苏力宏,等.污水厂剩余污泥制备烟气脱硫吸附剂[J].应用化学,2007,24(9):1045~1049.

[22]文青波,李彩亭,蔡志红,等.污泥基活性炭吸附空气中甲醛的研究[J].中国环境科学,2010,30(6):727~732.

[23]韩润平,陆雍森,杨健,等.生态滤池处理城市污水小试研究[J].环境污染治理技术与设备,2005,6(7):58~62.

[24]韩润平,陆雍森,杨健,等.复合床生态滤池处理城市污水中试研究[J].环境科学学报,2004,24(3):450~454.

[25]戴一琦,李银生,李旭东,等.不同有机负荷条件下分层蚯蚓生物滤池对生活污水的处理效果[J].上海交通大学学报:农业科学版,2010,28(1):35~40.

[26]杨健,赵丽敏,陈巧燕,等.水力负荷对生物滤池中蚯蚓抗氧化酶和消化酶活性的影响[J].环境科学,2009,(4):1029~1035.

[27]赵庆良,姜珺秋,王琨,等.微生物燃料电池处理剩余污泥与同步产电性能[J].哈尔滨工程大学学报,2010,31(6):780~785.

[28]丘锦荣,刘雯,郭晓方,等.利用城市污水厂脱水污泥直接生产草坪的研究[J].中国给水排水,2009,25(13):52~55.

[29]武建军.利用脱水污泥生产有机复合肥的工艺探讨[J].辽宁城乡环境科技,2007,27(4):30~32.

[30]王春艳,周集体,金若菲.利用脱水污泥制备微生物絮凝剂及其絮凝条件研究[J].中国给水排水,2007,23(21):105~108.

(上接第 21 页)

[3]李玲,匡琼芝,闵犁园,等.减压膜蒸馏淡化罗泊湖地下苦咸水研究[J].水处理技术,2007,33(1):67~70.

[4]李建梅,王树源,徐志康,等.真空膜蒸馏法浓缩益母草及赤芍提取液的实验研究[J].中成药,2004,26(5):423~424.

[5] Christensen K,Andresen R,Tandskov L,et al.Using direct contact membrane distillation for whey protein concentration.Desalination,2006,200(1~3):523~525.

[6]段小林.真空膜蒸馏脱除水溶液中 VOC 的研究[D].浙江工业

大学,2001.

[7]温培源,刘红斌,马军,等.VMD 处理反渗透浓水操作参数及水质评价[J].水处理技术,2011,37(7):83~86.

[8]刘东,武春瑞,吕晓龙.减压膜蒸馏法浓缩反渗透浓水试验研究[J].水处理技术,2009,35(5):60~63.

[9]王军,栾兆坤,曲丹,等.疏水膜蒸馏浓缩技术用于 RO 浓水回用处理的研究[J].中国给水排水,2007,23(19):1~5.