

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-019-07

热泵型废水浓缩系统浓缩特性的实验研究

王磊¹ 管海清² 胡自成¹

(1. 江苏大学能源与动力工程学院 镇江 212000;

2. 松下电器研究开发(苏州)有限公司 苏州 215000)

【摘要】 开发高效、低耗和环保的废水处理技术及装置具有重要的经济和社会效益。针对小型企业的废水处理需求,提出并搭建了基于热泵的新型废水浓缩系统,通过低温蒸发实现废水浓缩减量处理,实验探究了空气流量、废水流量及废水温度等对系统浓缩特性的影响。结果表明:随着空气流量增加,废水浓缩量随之增加,浓缩效率下降;废水流量和废水温度的提高均能使废水浓缩量和浓缩效率上升;系统的能效随着空气温度的升高和水温的降低而增大;本实验工况范围内,系统的最佳工况点为空气流量 550m³/h,废水流量 1.7m/s,废水温度 45℃,最佳工作点下系统的能效系数可达 7 以上,废水浓缩量可达 10.6L/h。

【关键词】 热泵; 废水浓缩; 低温蒸发; 实验研究

中图分类号 TB57.5/TK09 文献标志码 A

Experimental Study of Concentration Characteristics of Heat Pump Wastewater Concentration System

Wang Lei¹ Guan Haiqing² Hu Zicheng¹

(1. Jiangsu University School of energy and power engineering, Zhenjiang, 212000;

2. Panasonic R&D Center Suzhou Co., Ltd, Suzhou, 215000)

【Abstract】 The development of high-efficiency, low-consumption and environmentally friendly wastewater treatment technologies and devices has important economic and social benefits. In this paper, considering the wastewater treatment needs of small and micro-enterprises, a new heat pump wastewater concentration system is proposed and constructed to achieve wastewater concentration and reduction through low-temperature evaporation, and the effects of air flow, wastewater flow and wastewater temperature on the concentration characteristics of the system are experimentally investigated. The results showed that under the experimental conditions, as the air flow rate is increased, the wastewater concentration volume is increased and the concentration efficiency is decreased; the increases of both the wastewater flow rate and the wastewater temperature can lead to the increases of the wastewater concentration volume and the concentration efficiency; the energy efficiency of the experimental system is increased with the increase of air temperature and the decrease of water temperature. The air flow rate of 550m³/h, wastewater flow rate of 1.7m/s and wastewater temperature of 45℃ are the optimal working conditions of the system, and the wastewater concentration volume can reach 10.6 L/h with the system energy efficiency coefficient of over 7.0.

【Keywords】 Heat pump; Wastewater concentration; Low temperature evaporation; Experimental study

作者简介: 王磊 (1995.04-), 男, 硕士, E-mail: 1813724140@qq.com

通讯作者: 胡自成 (1976.06-), 男, 博士, 副教授, E-mail: hzc501@ujs.edu.cn

收稿日期: 2024-05-07

0 引言

随着工业化、城镇化的持续推进,我国水污染问题日渐严重,以“水十条”为代表的相关政策密集出台,对工业废水的排放和处理提出了更高的要求。并且近些年来,工业产能逐渐从大城市向中小城市转移,部分地区废水处理设施的升级改造过程无法及时跟进,城市内部的小微型企业往往位置分散不利于废水集中处理,部分企业更因为产出废水量较少而选择直接排放,使得水污染问题又有加重趋势。因此,高效、低耗、环保且能满足小微型企业独立使用的新型废水处理技术急需研发。

目前,工业废水浓缩减量处理方法主要有热法浓缩减量和膜法浓缩减量技术,包括机械式蒸汽再压缩蒸发(MVR)^[3]、多效蒸发(MED)^[4]、多级闪蒸(MSF)^[5]以及反渗透(RO)和纳滤(NF)^[6]等。但这些方法尚包括如下缺点:(1)投资费用较高且部分方法运行费用不低。(2)普遍需要专人维护并定期更换相关配件。(3)装置占空间面积大,适用于大规模集中处理,不能小型化或小批量处理成本较高。(4)需要一定的配套设施,比如蒸汽供应、火电厂附近等,且在部分环境恶劣地区使用受限,地区适应性不强。

为克服上述缺点,前人已有相关成果。一方面,为解决高温热源处理废水带来的投资高、耗能大及蒸发面易结垢和腐蚀等问题,研究了低温蒸发处理废水技术^[7]。其中 Willem Vriesendorp 等人^[8]介绍了低温常压蒸发技术在多领域废水处理中的应用情况; GaLiCos 低温常压蒸发设备^[9]、低温多效蒸发技术(LT-MED)^[10]、低温热法浓缩技术(LTE)^[11]等设备与方法也一定程度上实现了废水高质量资源化和低成本运行目标。另一方面,为进一步降低能耗,并减少蒸汽、占地空间以及专人维护等方面的限制,将热泵作为高效的热源引入废水处理领域,相关研究人员^[12-16]利用热泵配合源于海水淡化领域的增湿去湿技术,实现了含盐废水的处理,且系统效率较高。但总体而言,相关研究不够全面、系统,相关设备鲜见于实际应用。

笔者在前人的基础上设计一套热泵型废水浓缩系统并依此搭建了实验装置,探究了相关因

素对实验系统性能的影响并给出了该实验装置的最佳工况点,以供实际使用和相关工程借鉴。

1 实验系统及实验方法

1.1 系统设计参数及设备规格

针对小微企业月产 2~3 吨的废水处理需求,依据每日浓缩量高于 100L 进行设计计算,为满足多工况的实验需求,热泵压缩机、循环水泵以及风机均采用变频控制,适当偏大以留有余量。主要设备配置如表 1 所示。

表 1 实验系统主要设备配置表

Table 1 Main equipments of experimental system		
设备名称	型号	参数
变频压缩机	EAPM240D57UMT	额定功率 1.9kW
板式换热器	HTL52-28D	换热面积 1.46m ²
翅片蒸发器	——	双排 72 孔, 换热面积 23.18m ²
电子膨胀阀	DPF(TS1)1.65C-03	名义容量 10.4kW
变频风机	HZW120-8K-A01	120W, 8 级
变频水泵	HPH3-300EH	额定功率 340W
铂电阻	PT100	A 级精度: ±0.1℃
温湿度传感器	TS-FTM01	±0.3℃, ±3%RH
热敏式风速仪	HT-9829	0.1~25m/s, 精度 0.01m/s
电磁流量计	AXF025G	精度 0.50%
电参仪表	WT230	——

1.2 实验装置

实验装置主要由热泵系统、填料室及相关输送存储测量装置组成。其中热泵系统主要包括压缩机、冷凝器、蒸发器、膨胀阀等; 填料室由填料、液体分布器、布液板等组成; 同时还有溶液及空气输送管道、储液装置、水泵及相关的测量装置等。实验装置实物如图 1 所示。

该实验装置主要利用低温蒸发让空气在填料室中带走废水中的水分,再通过冷凝除湿回收空气中的水分,达到浓缩废水并回收冷凝水的目的。整个实验系统可主要分为废水循环、空气循环和冷媒循环三个循环回路。系统中的能量变化为: 废水在热泵冷凝器侧被加热以及在填料室中进行热湿交换放热给空气; 空气在填料室中被加热加湿以及在热泵蒸发器侧被冷却除湿; 冷媒循环为典型的逆卡

诺循环。装置系统流程如图 2 所示。

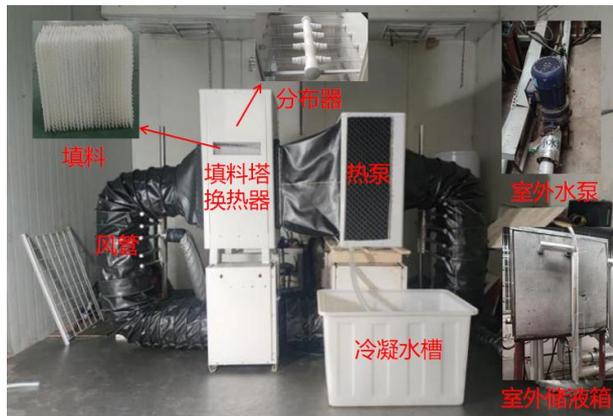
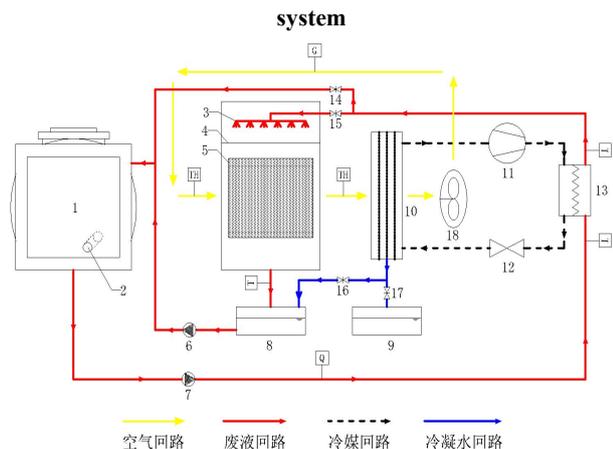


图 1 废水浓缩系统实物图

Fig.1 Physical drawing of waste liquid concentration system



- 1—储液箱; 2—电加热器; 3—液体分布器; 4—布液板;
- 5—规整填料; 6、7—水泵; 8—临时储液槽; 9—冷凝水槽;
- 10—蒸发器; 11—压缩机; 12—电子膨胀阀; 13—冷凝器;
- 14、15、16、17—截止阀; 18—风机; TH—空气温湿度;
- Q—废水流量; T—废水温度; G—风量

图 2 废水浓缩系统流程图

Fig.2 Flow chart of waste liquid concentration system

1.3 实验方法

1.3.1 实验流程

(1) 废水浓缩系统影响因素分析

通过单因素分析的方法, 定废水浓度测试以确定最佳浓缩工况点。废水流量、温度及空气流量等多个因素均会影响废水的浓缩效果, 通过将回收的冷凝水返回临时储液槽以保持废水浓度不变, 只改变单一因素对废水浓缩的影响, 以得到最佳工况点, 实验结果见图 3、4、5、6、7。由图 2 可知, 该流程需要打开阀门 15、16, 关闭阀门 14、17。其中, 为单独测试变工况对热泵能效 (制热 COP)

的影响, 可断开蒸发器 10 两侧的风管, 打开阀门 14、16, 关闭阀门 15、17。

(2) 系统实际浓缩效果探究

为探究装置的实际浓缩效果, 将冷凝水回收到冷凝水槽, 废水持续浓缩以验证装置在实际应用中的可行性, 实验结果见图 8、9。由图 2 可知, 该流程需要打开阀门 15、17, 关闭阀门 14、16。

1.3.2 评价指标

评价指标分为能力能效评价和浓缩效果评价两部分。

(1) 能力能效评价

实验装置同时利用热泵的冷负荷和热负荷, 因此整个实验装置的理论能力为热泵制冷制热能力之和。理论能效系数 ε 为系统的总能力与总消耗的比值, 其值越大表明系统能效越高。热泵制热能效 COP 及实验装置能效系数 ε 计算如式 (1)、式 (2) 所示。

$$COP = \frac{Q_h}{P_{th}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_c + Q_h}{P_{th} + P_e} \quad (2)$$

式中: Q_c 为蒸发器侧冷负荷 (热泵制冷量); Q_h 为冷凝器侧热负荷 (热泵制热量); P_{th} 为压缩机耗功量, kW; P_e 为其他耗功部件, 主要包括水泵、风机的功率等, kW。

(2) 浓缩效果评价

浓缩效果的评价可分为浓缩量和浓缩效率两部分, 其中浓缩量 (即冷凝水回收速率) 可由填料进出口的空气的水蒸气含湿量差得出, 也可通过回收的冷凝水得到。浓缩量 Δd 的计算如式 (3) 所示, g/s。

$$\Delta d = G(\omega_{a.out} - \omega_{a.in}) \quad (3)$$

式中: G 为空气流量, kg/s; $\omega_{a.out}$ 为填料出口空气含湿量, g/kg; $\omega_{a.in}$ 为填料进口空气含湿量, g/kg。

浓缩效率 η 为填料进出口空气含湿量差与废水相平衡时空气的含湿量 (即废水表面饱和和空气层的含湿量) 和进口空气的含湿量差之比, 浓缩效率越高即浓缩效果越好, 定义如式 (4) 所示。

$$\eta = \frac{\omega_{a.out} - \omega_{a.in}}{\omega_{a.s} - \omega_{a.in}} \quad (4)$$

式中: $\omega_{a.s}$ 为废水相平衡时 (即废水表面饱和

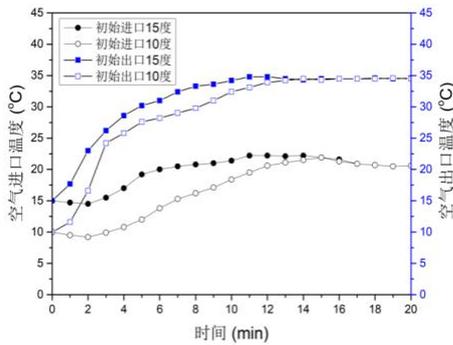
空气层的含湿量) 空气的含湿量, g/kg。

2 实验结果及分析

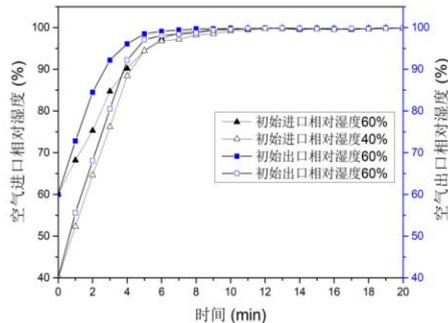
2.1 空气进口温湿度对装置浓缩性能的影响

为探究空气进口温湿度对浓缩装置的影响, 选择两组不同温湿度的进口空气进行对比实验。一组空气进口温度 15℃, 相对湿度 60%; 另一组空气进口温度 10℃, 相对湿度 40%。实验过程中保持废水喷淋温度、废水流量和空气流量不变, 废水喷淋温度取 45℃, 废水流量取 1.4m³/h, 空气流量取 500m³/h, 测试结果如图 3 所示。

从图 3 中可知, 不同初始进口温湿度的空气在实验装置中不断循环, 经过 20 分钟左右, 填料侧进口和出口的空气温度均趋于稳定; 经过 10 分钟左右填料侧进口和出口的空气湿度均趋于饱和状态, 区别只在于初始温度较高, 湿度较大的空气能更快地进入稳定运行工况, 故初始的进风温湿度不影响实验装置后续的稳定运行。



(a) 空气进出口温度随时间变化



(b) 空气进出口湿度随时间变化

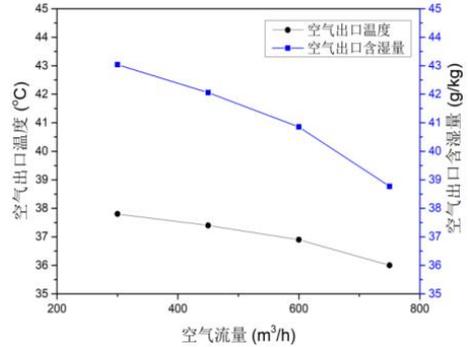
图 3 空气进口温湿度对装置浓缩性能的影响

Fig.3 Influence of air inlet temperature and humidity on concentration performance

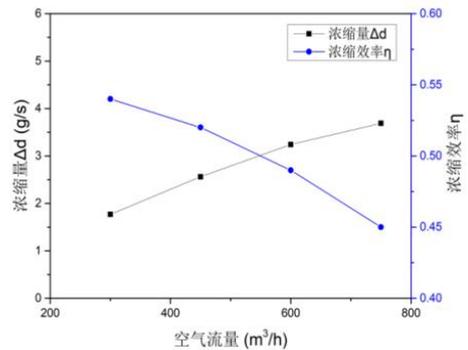
2.2 空气流量对装置浓缩性能的影响

在变空气流量实验中, 废水流量控制在

1.4m³/h, 废水喷淋温度 45℃, 空气流量工况范围取 300~750m³/h, 实验结果见图 4。从图 4 (a) 中可知, 随着空气流量增大, 填料室中空气的出口温度和含湿量均下降。从图 4 (b) 中可知, 随着空气流量增大, 浓缩效率随之降低, 浓缩量随之增加, 从 1.77g/s 增加到 3.69g/s, 但增加的幅度逐渐变小。



(a) 空气流量对空气出口温湿度的影响



(b) 空气流量对浓缩量和浓缩效率的影响

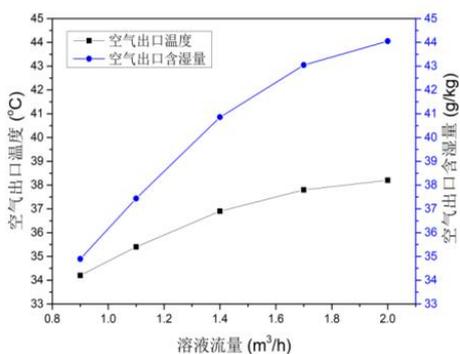
图 4 空气流量对装置浓缩性能的影响

Fig.4 Influence of air flow rate on concentration performance

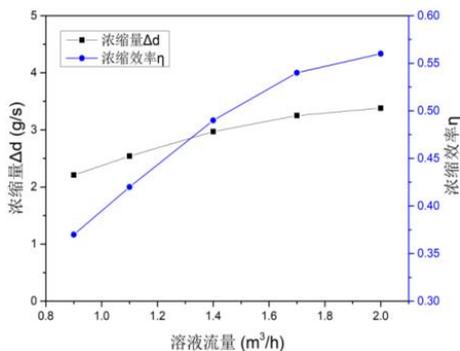
这是由于随着空气流量增大, 风速提高, 单位体积的废水与空气的接触时间变短, 从而导致热质交换不够充分, 空气侧吸收显热的时间减少, 单位体积空气的吸湿能力降低, 浓缩效率降低, 相变产生的潜热量也减少, 所以空气出口的温度和含湿量均降低。但单位时间内整体空气的吸湿能力增加, 浓缩量随之增加。单位体积的空气的传质效率会随之越来越低, 使得浓缩量的增加趋势会逐渐变缓。风量的增大也会导致循环过程中风阻增大和风机功率的增加, 因此不能为了增加浓缩量而一味追求高风量。图 4 (b) 中浓缩量和浓缩效率的交点附近, 浓缩量较高, 浓缩效率也未降太低, 可作为适宜风量点, 空气流量在 550m³/h。

2.3 废水流量对装置浓缩性能的影响

在变废水流量实验中, 空气流量控制在 $550\text{m}^3/\text{h}$, 废水喷淋温度 45°C , 废水流量工况范围取 $0.9\sim 2\text{m}^3/\text{h}$, 实验结果见图 5。从图 5 (a) 中可知, 随着废水流量增加, 空气出口温度和出口含湿量随之增加, 但趋势逐渐变缓。从图 5 (b) 中可知, 随着废水流量增加, 浓缩效率和浓缩量随之增加, 且增加的趋势均逐渐变缓, 其中浓缩量从 2.21g/s 增加到 3.38g/s 。



(a) 废水流量对空气出口温湿度的影响



(b) 废水流量对浓缩量和浓缩效率的影响

图 5 废水流量对装置浓缩性能的影响

Fig.5 Effect of solution flow rate on concentration performance of device

这是由于废水流量的增加提高了废水表面更新率和填料润湿率, 形成完善的降膜流动以改善填料表面液相的流动状态。废水表面能保持较高的温度和水蒸气分压力, 空气能吸收更多的热量和水分, 提高了气液间的热质交换效率, 故空气出口温湿度以及装置的浓缩量和浓缩效率均随之升高。随着废水流量的继续增加, 填料被完全润湿, 有效热质交换面积增加速度变缓, 气液间温差和含湿量差也逐渐减小, 使得升高趋势逐渐变缓。同时, 废水

流量的继续增加会导致液膜太厚且不稳定, 也增加了空气侧的阻力和循环水泵的能耗, 因此选择废水流量为 $1.7\text{m}^3/\text{h}$, 此时既有较高的浓缩量和浓缩效率, 也不会增加较多能耗。

2.4 废水温度对装置浓缩性能的影响

2.4.1 废水温度对热泵性能的影响

为了较为全面的探究废水温度对热泵性能的影响, 可拆除风管且不使用填料塔换热器, 单独测试热泵模块性能, 对空气进口温度在 $-20\sim 25^\circ\text{C}$, 废水出口温度在 $35\sim 55^\circ\text{C}$ 之间的热泵能效即 COP 进行系统的测试, 测试结果见图 6。从图 6 中可知, 热泵系统的 COP 随空气进口温度的升高而升高, 随废水出口温度的升高而降低。考虑到图 3 所示稳定后的循环空气温度基本在 20°C 以上, 此时图 6 中废水出口温度 45°C 与 50°C 之间的 COP 差值逐渐变大, 选择废水出口温度 45°C 之下, 热泵的技术经济性相对更好。故在后续的废水浓缩实验中, 不能一味的追求高热源温度, 应兼顾浓缩效果和热泵的高能效。

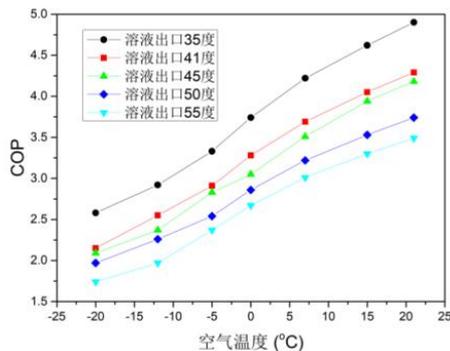
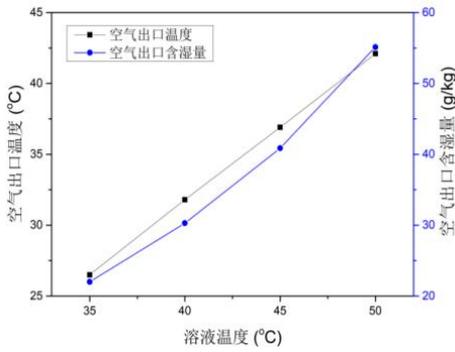


图 6 空气进口温度和废水出口温度对热泵 COP 的影响

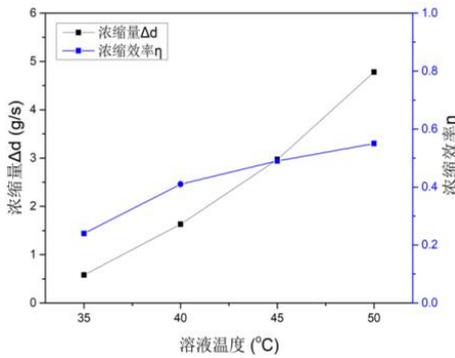
Fig.6 Effect of air inlet temperature and waste liquid outlet temperature on heat pump COP

2.4.2 废水温度对浓缩效果的影响

在变废水温度实验中, 空气流量控制在 $550\text{m}^3/\text{h}$, 废水流量控制在 $1.7\text{m}^3/\text{h}$, 废水喷淋温度 (即废水出口温度) 工况范围取 $35\sim 50^\circ\text{C}$, 实验结果见图 7。从图 7 (a) 中可知, 随着废水温度升高, 空气出口温度和出口含湿量随之增加。从图 7 (b) 中可知, 随着废水温度升高, 浓缩效率和浓缩量随之增加, 其中浓缩量从 0.58g/s 增加到 4.78g/s , 浓缩效率升高幅度逐渐变缓。



(a) 废水温度对空气出口温湿度的影响



(b) 废水温度对浓缩量和浓缩效率的影响

图 7 废水温度对装置浓缩性能的影响

Fig.7 Effect of solution temperature rate on concentration performance of device

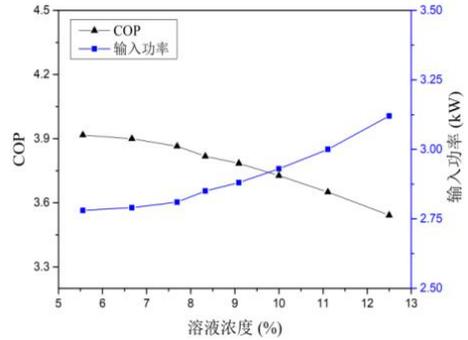
这是由于随着废水温度升高，气液间温差加大，废水表面水蒸气分压力随着温升而增大，气液间的水蒸气分压力差加大，从而空气与废水间的传热传质驱动力增大，热质交换效率提高，空气出口温湿度及装置浓缩量和浓缩效率均随之升高。较高水温时，浓缩效率升高幅度逐渐变缓说明废水表面饱和空气含湿量的增长速度大于空气出口含湿量的增长速度。虽然水温越高浓缩效果越好，但结合图 6 的分析，考虑到废水温度继续升高时，装置的能效降幅相对更大，且温度较高时更易结垢和腐蚀，实验装置的废水喷淋温度选择 45℃。

综上所述，为了在维持较高冷凝水回收速率和浓缩效率的同时，能耗相对较低，确定实验装置的最佳工况为：废水喷淋温度 45℃，废水流量 1.7m³/h，空气流量 550m³/h。

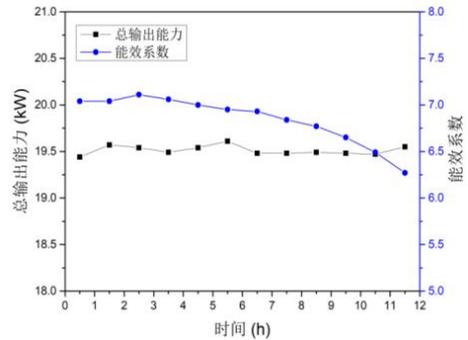
2.5 实验装置的能效分析

在已确定的最佳工况下，即空气流量 550m³/h，废水流量 1.7m³/h，废水喷淋温度 45℃，实验装置持续运行浓缩废水，实验结果见图 8。从图 8 (a)

中可知，随着废水不断浓缩，废水浓度提高，热泵能效即 COP 随之下降，输入功率随之升高；从图 8 (b) 中可知，随着装置持续运行，实验装置总的输出能力变化不大，维持在 19.5kW 左右；其能效系数在实验前期能达到 7 以上，具有较好的能效水平，但随着实验进行持续下降，且下降趋势逐渐增大。



(a) 废水浓度对热泵能效和功率的影响



(b) 实验装置能力能效随时间变化趋势

图 8 能效分析

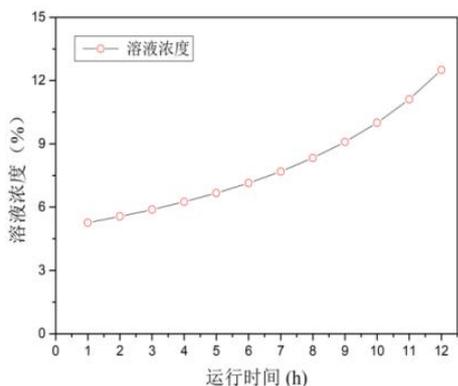
Fig.8 Energy efficiency analysis

在实验前期，废水浓度变化对浓缩性能的影响较少，能力能效在前期基本稳定。随着废水持续浓缩，废水浓度提高，一方面导致冷凝侧换热系数下降，提高了冷凝温度，从而降低了热泵能效，为了维持输出能力不变，输入功率增加。另一方面由于废水浓度的提高导致废水表面空气含湿量降低，则水蒸气分压力降低，即降低了主流空气和液面饱和空气的水蒸气分压力差和含湿量差，从而导致气液间的传热传质效率降低，故实验装置的能效系数ε随着实验进程逐渐下降且下降幅度加快。

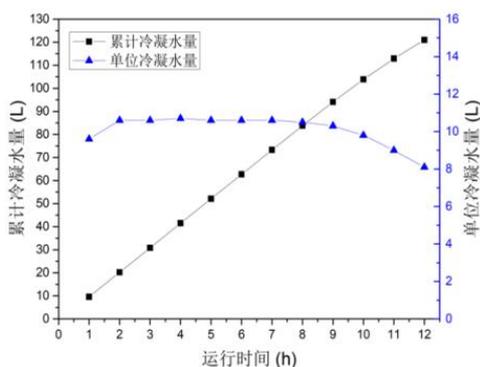
2.6 实验装置的浓缩效果

从图 9 (a) 中可知，随着实验装置的持续运行，废水浓度不断提高，12h 后，废水浓度从 5%

提高到 12.5%; 从图 9 (b) 中可知, 累计回收的冷凝水量持续升高, 但升高趋势变缓; 单位冷凝水量在初始运行时较低, 这与装置需要一段时间才能稳定运行有关。在之后几个小时, 冷凝水量基本维持在 10.6L/h 左右; 但随着废水浓度的提高, 单位冷凝水量开始下降且降低幅度逐渐增加。实验装置在 12h 内累计回收了 121L 的冷凝水, 约占废水总体积的 60%。



(a) 废水浓度随时间变化趋势



(b) 冷凝水量随时间变化的趋势

图 9 装置浓缩能力随时间变化的趋势

Fig.9 Trends in device concentration capacity over time

3 结论

笔者设计了一套热泵型废水浓缩系统, 利用低温蒸发技术辅以热泵可节约能源, 辅以填料塔式换热器可提高气液间的传热传质效率; 同时搭建了实验装置, 通过实验研究分析了变工况对该系统性能的影响, 得到了实验装置的最佳运行工况点及其实际浓缩性能, 主要结论如下:

(1) 循环空气的初始温湿度不影响实验装置后续的稳定运行, 不同温湿度循环空气下, 实验装置运行 20 分钟左右后均可达到稳定运行状态。

(2) 在给定测试工况范围内, 增大空气流量能增加实验装置浓缩量但会导致浓缩效率降低; 提高溶液流量和温度均能使实验装置的浓缩性能提高。

(3) 确定了实验装置最佳的运行工况点在空气流量 550m³/h, 废水流量 1.7m³/h, 废水喷淋温度 45℃, 此工况点下能兼顾能力能效和浓缩性能。

(4) 实验装置能够满足小微企业月产 2~3 吨的废水处理需求, 12h 内能浓缩回收 121L 的冷凝水并且装置能效能达到 7 以上, 节能效果明显, 且无污染排放, 更适用于小微企业自行处理生产排放的热敏性废液, 具有良好的市场发展前景。

参考文献:

- [1] 杜欣, 杨冬, 王冰. 燃煤电厂脱硫废水零排放技术现状与展望[J]. 区域供热, 2021, (3): 134-139.
- [2] 安雪峰, 刘广建, 陈海平. 燃煤电厂脱硫废水热法零排放系统设计及分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 175-183.
- [3] Azimibavil S, Jafarian A. Heat transfer evaluation and economic characteristics of falling film brine concentrator in zero liquid discharge processes - ScienceDirect[J]. Journal of Cleaner Production, 2020.
- [4] Prajapati Mitul, Shah Manan, Soni Bhavna. A comprehensive review of the geothermal integrated multi-effect distillation (MED) desalination and its advancements[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2022, 19.
- [5] Lawal Dahiru U, Antar Mohamed A, Ismaila Kehinde G, et al. Hybrid multi-stage flash (MSF) and membrane distillation (MD) desalination system for energy saving and brine minimization[J]. Desalination, 2023, 548.
- [6] 李仕芳, 黄治梁, 周密. 膜分离技术处理油田废水研究现状及展望[J]. 化学工程师, 2022, 36(7): 63-67.
- [7] 程凯. 低温蒸发应用于工业废水零排放的现状与展望[J]. 云南化工, 2020, 47(2): 13-14.
- [8] Willem Vriesendorp, 刘琴. 创新型处理高污染废水的低温常压蒸发技术[J]. 世界农药, 2014, 36(3): 56-58.
- [9] 张传可, 陈敏, 赵旭东, 等. 低温常压蒸发技术处理稀酸[C]. 《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(下册), 2019: 19-20, 23.

(下转第 81 页)

- curved Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2011,34(4):1109-1116.
- [5] Bovand M, Valipour MS, Eiamsa-ard S, et al. Numerical analysis for curved vortex tube optimization[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014,50:98-107.
- [6] 申江,边煜竣,郭欣炜.冷端管径对涡流管性能影响的实验研究[J].制冷学报,2017,38(6):87-93.
- [7] 何曙,吴玉庭,姜曙,等.喷嘴对涡流管能量分离效应影响[J].化工学报,2005,(11):41-44.
- [8] 何丽娟,王淑旭,吴心伟,等.喷嘴结构对涡流管性能的影响[J].热能动力工程,2020,35(6):123-128.
- [9] 王远鹏,聂荣华,林明峰.六流道喷嘴涡流管能量分离特性的研究[J].制冷学报,2007,(2):48-50.
- [10] 张智臣.涡流管制冷技术以及在矿井中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021,(6):128-129.
- [11] 何丽娟,赵辉通,李海燕,等.喷嘴流道数对涡流管性能影响的实验研究[J].流体机械,2021,49(12):6-11,18.

(上接第25页)

- [10] Zhao Dongfeng, Xue Jianliang, Li Shi, et al. Theoretical analyses of thermal and economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high-salinity wastewater[J]. Desalination, 2011,273:292-298.
- [11] 郭红兵,李瑞基,李瑞杰,等.低温热法浓缩工艺(LTE)处理高盐废水工业化试验研究[J].有色冶金节能,2021,37(4):49-53.
- [12] 高宏太,金苏敏,陈亮.热泵型电镀废水处理系统性能的试验研究[J].流体机械,2015,43(10):7-10,36.
- [13] 鄢泉,杨雪峰,车建业,等.处理低水平放射性废液热泵蒸发技术的工程应用研究[C].中国核学会核化工分会放射性三废处理、处置专业委员会学术交流会论文集,2011:266-271.
- [14] Hamieh B M, Beckman J R. Seawater desalination using Dewvaporation technique:Theoretical development and designevolution[J]. Desalination, 2006,195(1-3):1-13.
- [15] 张慧晨,柳建华,刘林川,等.热泵低温蒸发系统用于工业废水浓缩性能研究[J].热能动力工程,2020,35(1):204-209,253.
- [16] 戎铖,张锁龙,戴玮,等.空气为媒介的含盐废水处理系统实验研究[J].水处理技术,2018,44(2):51-55.