

# 高盐废水蒸发结晶过程采用机械蒸汽再压缩(MVR)技术特性研究

侯超<sup>1,2</sup>, 杨鲁伟<sup>1,2\*</sup>, 蔺雪军<sup>1</sup>, 陶磊<sup>3</sup>, 孙桂祥<sup>3</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 北京华源泰盟节能设备有限公司, 北京 100084)

**摘要:**为解决高盐废水蒸发结晶过程能耗较高的问题,设计开发了一套高效、节能的MVR热泵蒸发结晶系统,并以羟丙基甲基纤维素(HPMC)生产过程产生的高盐废水作为被处理物料开展实验研究。结果表明,开发的MVR热泵蒸发结晶系统运行稳定,各项工艺参数达到设计要求;系统蒸发量、运行能耗、COP、SMER等系统性能参数随着蒸发温度的升高逐渐增大,且理论值与实验值拟合较好;系统节能效果显著,相比传统三效与四效蒸发可分别节约标煤56.0%、41.4%,分别节约运行费用38.8%和18.3%。

**关键词:**蒸发结晶;机械蒸汽再压缩;高盐废水;热泵;经济性分析

中图分类号:TQ051

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)06-0211-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.06.043

## Characteristics research on application of mechanical vapor recompression (MVR) technology in evaporation and crystallization of high salinity wastewater

HOU Chao<sup>1,2</sup>, YANG Lu-wei<sup>1,2\*</sup>, LIN Xue-jun<sup>1</sup>, TAO Lei<sup>3</sup>, SUN Gui-xiang<sup>3</sup>

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Beijing Huayuantaimeng Energy-saving Equipment Company Limited, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A set of mechanical vapor recompression (MVR) heat pump evaporation-crystallization system with the characteristics of efficient and energy-saving is developed to reduce the energy consumption in the treatment of high salinity wastewater. High salinity wastewater generated in the production process of hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) is used as the test medium for a series of experimental studies. The results show that the developed MVR system runs stably with various process parameters meeting the design requirements. The system performance parameters such as evaporation capacity, operation power consumption, COP, and SMER increase with the increasing evaporation temperature, and the simulated values fit well with the experimental values. Moreover, the system can achieve a significant energy conservation effect. Compared with traditional three-effect and four-effect evaporation systems, it saves about 56.0% and 41.4% of standard coal, respectively, and saves 38.8% and 18.3% of operation cost.

**Key words:** evaporation and crystallization; mechanical vapor recompression; high salinity wastewater; heat pump; economic analysis

在国民日常生活与生产过程中会产生大量的废水,其中相当大的一部分含盐量超过1%,属于典型的高盐废水<sup>[1]</sup>。该类废水通常还含有大量的有机物,由于组成成分复杂且水量较大,导致治理成本高、难度大,其处理问题已成为制约相关行业可持续发展的瓶颈。目前,各类高盐废水的处理通常采用“预处理+蒸发结晶”的主体工艺路线;预处理阶段,根据所含有有机物组分的差异选取不同的预处理技

术,如萃取<sup>[2]</sup>、吸附<sup>[3]</sup>、高级氧化<sup>[4]</sup>等,以达到有机物资源回收或无害化去除的目的;进一步,对预处理后的高盐废水进行蒸发结晶<sup>[5]</sup>,实现结晶盐的资源回收与蒸发冷凝液的回用。多效蒸发是目前高盐废水蒸发结晶过程常用的一种工艺,但由于末效蒸发产生的二次蒸汽需要被冷凝,造成大量低品位热能的浪费,同时还需要消耗循环冷却水,导致蒸发过程热能利用率偏低、能耗较高<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2021-08-04;修回日期:2022-04-07

基金项目:北京市科技计划(Z181100009618009);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010405);科工局乏燃料后处理专项-低放废液热泵蒸发工程样机研制

作者简介:侯超(1991-),男,博士生,研究方向为热力过程优化与节能,ucas\_hc@163.com;杨鲁伟(1970-),男,博士,研究员,研究方向为热力过程优化与节能,通讯联系人,lwyang2002@mail.ipc.ac.cn。

机械蒸汽再压缩(mechanical vapor recompression, MVR)热泵技术是目前较为先进的节能技术,可以实现蒸发过程中低品位余热的高效回收再利用,从而减少对外界能源的需求。该技术有助于提高蒸发过程能源利用效率、降低 CO<sub>2</sub> 排放,是实现过程减排降碳、节能环保的重要技术保障,对早日达到碳达峰和碳中和的战略目标具有重要意义。

MVR 热泵技术凭借能耗低、结构紧凑、热能利用率高等特点受到越来越多的关注。梁林等<sup>[7]</sup>开发了用于维 C 溶液浓缩的 MVR 热泵蒸发系统,该设备在低温下进行蒸发,与传统的三效、四效蒸发相比,可分别节约 41.2%、21.6% 的标煤;Ye 等<sup>[8]</sup>针对垃圾渗滤液采用 MVR 热泵蒸发处理的可行性进行了实验研究,通过 MVR 热泵处理,废液中有害成分得到显著降低,并且处理成本与传统技术相比下降 27%;姜华等<sup>[9]</sup>提出了降膜蒸发与强制循环蒸发并联的蒸发结晶系统,通过综合能量分析发现该系统焓效率比传统三效蒸发结晶系统高 51.5%,热力学完善程度更高。

为解决高盐废水蒸发结晶过程能耗高的问题,本文中提出将 MVR 热泵技术应用于高含盐废水处理领域的思路,设计开发一套高效、节能的 MVR 热泵蒸发结晶装置,并以实际生产工艺废水为被处理物料,通过理论计算和实验研究相结合的方法进行系统性能分析,为 MVR 热泵技术工程应用提供参考。

## 1 MVR 热泵蒸发结晶系统

### 1.1 系统工艺流程及热力学原理

MVR 热泵蒸发结晶系统工艺流程及热力状态变化如图 1、图 2 所示,原料储罐内的物料在进料泵的驱动下经预热器预热后由循环管路进入系统(热力状态变化 0-1);物料在循环泵的驱动下进入蒸发器管程,经过与壳程的加热蒸汽换热后进入结晶器沸腾蒸发,得到的二次蒸汽经气液分离后进入蒸汽压缩机(热力状态变化 1-2),析出的晶体颗粒沉降至结晶器底部,剩余的饱和液进入循环管继续参与蒸发;二次蒸汽压缩后为过热状态,消除过热度后成为饱和蒸汽,重新返回蒸发器壳程作为热源加热物料(热力状态变化 2-3'-3);蒸汽释放潜热后冷凝成水进入冷凝液罐(热力状态变化 3-4);高温的冷凝液作为热源预热进料后达标排放或回用于生产工艺(热力状态变化 4-5);结晶器下部晶浆进入稠厚器沉淀增稠,上清液溢流进入母液罐后打回系统继续

参与循环,下部晶粒排入离心机,脱水后得到结晶盐;该系统通过远程自动控制,使操作更为简便。

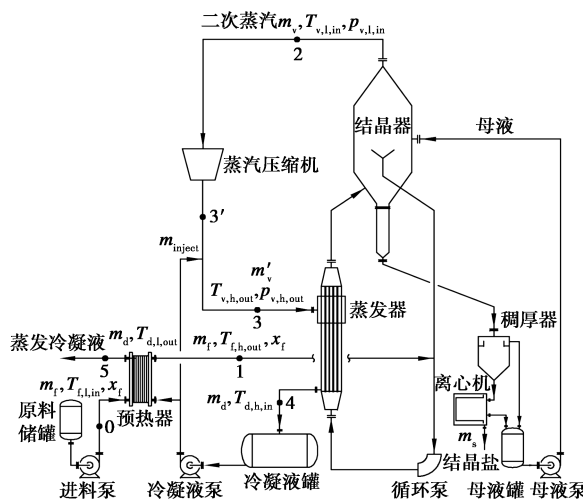


图 1 MVR 热泵蒸发结晶系统流程

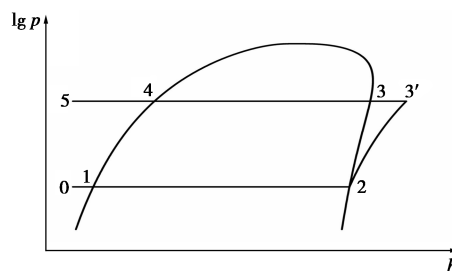


图 2 热力状态变化  $h$ - $\lg p$  图

### 1.2 系统关键设备数学模型

#### 1.2.1 预热器

预热器用于低温进料预热,通过与蒸发冷凝液进行热交换,达到系统余热回收的目的。系统采用板式换热器作为预热器,热交换过程能量平衡如式(1)所示:

$$\begin{aligned} m_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,h,out} - T_{f,l,in}) &= \\ m_d \cdot c_{p,d} \cdot (T_{d,h,in} - T_{d,l,out}) &= \\ K_{pre} \cdot A_{pre} \cdot \Delta T_{lm,pre} & \quad (1) \end{aligned}$$

式中, $m$  为质量流量,  $\text{kg/s}$ ;  $c_p$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $K$  为传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $A$  为换热面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta T_{lm}$  为对数换热温差,  $\text{K}$ 。下标  $f$  与  $d$  分别表示物料与蒸发冷凝液;  $h$  与  $l$  分别表示高温与低温物料;  $in$  与  $out$  分别表示流入与流出。

#### 1.2.2 蒸汽压缩机

蒸汽压缩机用于二次蒸汽潜热的回收与蒸汽的再压缩,是 MVR 系统的核心部件和主要耗能部件,本系统选用离心蒸汽压缩机。蒸汽的压缩过程可视作多变压缩,压缩机轴功率计算如下<sup>[10]</sup>:

$$W_{pol} = m_v \cdot n \cdot z \cdot R_g \cdot T_{v,l,in} \cdot$$

$$\left\{ \left[ \left( p_{v,h,out} / p_{v,l,in} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] / \left[ 3600 \cdot (n-1) \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{me} \cdot \eta_{motor} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, $n$ 为多变指数; $z$ 为压缩性系数, $z \approx 1$ ;  $R_g$ 为气体常数, $J/(kg \cdot K)$ ;  $p$ 为压力,Pa;  $\eta_{pol}$ 、 $\eta_{me}$ 、 $\eta_{motor}$ 分别代表多变效率、机械效率、电机效率。

### 1.2.3 蒸发器

蒸发器是系统的主要换热设备,换热过程中能量平衡关系如式(3)所示:

$$c_{p,f} \cdot m_{f,eva,in} \cdot T_{f,eva,in} + Q_{eva} = c_{p,f} \cdot m_{f,eva,in} \cdot T_{f,eva,out} \quad (3)$$

式中, $Q_{eva}$ 为蒸发器内换热量,通过式(4)进行计算:

$$Q_{eva} = m_v \cdot r_{v,h,out} = K_{eva} \cdot A_{eva} \cdot \Delta T_{av,eva} \quad (4)$$

式中, $r_{v,h,out}$ 为蒸发器壳程加热蒸汽冷凝潜热, $J/kg$ ;  $K_{eva}$ 、 $A_{eva}$ 、 $\Delta T_{av,eva}$ 分别为蒸发器传热系数、换热面积、换热温差。

### 1.2.4 结晶器

结晶器是实现晶体颗粒生长及气液分离的关键设备,主要参数为直径与高度,分别由式(5)、式(6)计算求得<sup>[11]</sup>:

$$d_{cry} = 0.0188 \cdot (V_v/u_v)^{0.5} \quad (5)$$

$$H_{cry} = (V_{f,out}/60 \cdot t)/47.1d_{cry}^2 + 1.2d_{cry} \quad (6)$$

式中, $V$ 为体积流量, $m^3/s$ ;  $u$ 为流速, $m/s$ ;  $t$ 为停留时间,min;下标 $v$ 与 $cry$ 分别代表蒸汽与结晶器。

## 1.3 实验系统搭建

根据计算结果完成MVR热泵蒸发结晶系统的设计及搭建。该系统主要包括离心蒸汽压缩机、结晶器、蒸发器、预热器、强制循环泵、各类阀件、数据采集装置等,工艺设计参数及关键设备参数见表1。

表1 系统工艺设计参数及关键设备参数

工艺设计参数	参数值
系统处理量/( $kg \cdot h^{-1}$ )	2500
系统设计蒸发量/( $kg \cdot h^{-1}$ )	2100
沸点升高/ $^{\circ}C$	9
设计蒸发温度/ $^{\circ}C$	85
关键设备参数	
压缩机体积流量/( $m^3 \cdot min^{-1}$ )	109
蒸发器换热面积/ $m^2$	210
预热器换热面积/ $m^2$	10
结晶器外形尺寸/ $m$	$\phi 1.96$
循环泵流量/( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	1500

为了实时监控系统运行状态,需要对系统工艺参数进行监测,主要包括蒸发温度及压力、压缩机吸排汽温度及压力、进料流量、蒸发冷凝液流量、结晶器及冷凝液罐液位、系统运行功率等参数,表2给出了系统参数测量时采用的仪器仪表技术参数。

表2 系统测量仪表技术参数

传感器	测量参数	量程	精度
温度传感器	气相、液相温度	0~150 $^{\circ}C$	$\pm 0.15^{\circ}C$
压力变送器	气相压力	0~200 kPa	$\pm 0.5\%$
涡街流量计	冷凝液流量	0~3 $m^3/h$	$\pm 1.5\%$
电磁流量计	进料流量	0~4 $m^3/h$	$\pm 0.5\%$
磁翻板液位计	冷凝液罐液位	0~800 mm	$\pm 1\%$
差压式液位计	结晶器液位	0~5000 mm	$\pm 0.5\%$

## 2 实验材料及系统性能评价指标

### 2.1 实验物料分析

实验过程以羟丙基甲基纤维素(HPMC)生产废水为被处理物料开展研究,水质如表3所示。HPMC是以天然纤维素为原料,经过一系列反应得到的一种纤维素混合醚,被广泛应用于建筑<sup>[12]</sup>、造纸<sup>[13]</sup>、医药<sup>[14]</sup>等行业。在HPMC的生产过程中,伴有大量高盐有机废水产生,主要成分为氯化钠、水、有机物质,通过蒸发结晶可实现盐、水分离及蒸发冷凝液回用。

表3 HPMC废水水质表

物性参数	数值	物性参数	数值
TDS/( $mg \cdot L^{-1}$ )	160000	TP/( $mg \cdot L^{-1}$ )	0.01
COD/( $mg \cdot L^{-1}$ )	15000	pH	6.26
TN/( $mg \cdot L^{-1}$ )	13.1	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1080

### 2.2 系统性能评价指标

为了便于系统性能分析,提出以下性能评价指标,包括蒸发量、运行功率、制热性能系数(COP)、单位能耗蒸发量(SMER)、去除率等。

蒸发量是指系统稳定运行时,单位时间内从原料液中蒸出冷凝液的流量,是评价系统处理能力大小的重要参数。

制热性能系数(COP)是衡量MVR系统性能的重要指标,是指在额定的工况下,获得的热量与消耗功率之比,系数越大,系统经济性越好,计算公式如式(7)<sup>[15]</sup>:

$$COP = (m_v \cdot r_{v,h,out}) / (3600 \cdot W_{sys}) \quad (7)$$

式中, $m_v$ 为系统蒸发量, $kg/h$ ;  $r_{v,h,out}$ 为蒸发器壳程加热蒸汽冷凝潜热, $J/kg$ ;  $W_{sys}$ 为系统运行功率, $W$ 。

单位能耗蒸发量(SMER)是指消耗单位能量从物料中蒸发水分的质量,通过式(8)进行计算<sup>[15]</sup>:

$$SMER = (1000 \cdot m_v) / W_{sys} \quad (8)$$

去除率用于反应蒸发过程对原液中盐分及有机

物的去除效果,通过式(9)进行计算:

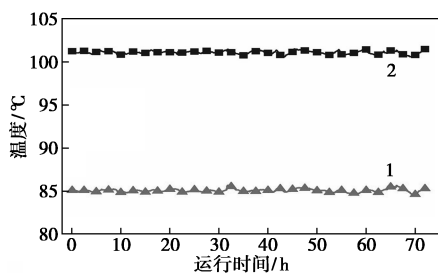
$$\eta_{re,TDSorCOD} = (x_{f,TDSorCOD} - x_{d,TDSorCOD}) / x_{f,TDSorCOD} \quad (9)$$

式中,  $x_{f,TDSorCOD}$  与  $x_{d,TDSorCOD}$  分别为废水原液及蒸发冷凝液中 TDS 或 COD 的浓度, mg/L。

### 3 实验数据分析与讨论

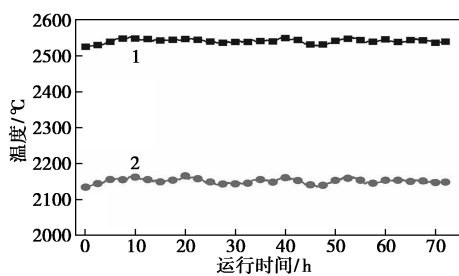
#### 3.1 系统运行稳定性分析

图 3、图 4 所示分别为系统在设计蒸发温度 85℃ 时,运行过程中温度参数与流量参数随运行时间的变化曲线。如图所示,在长达 72 h 的连续运行过程中,各参数在某一均值附近波动变化,波动范围较小。系统平均进料流量为 2 541 kg/h,平均蒸发量为 2 137 kg/h,均达到设计要求。系统蒸发温度平均值为 85.2℃,波动范围 ±1.1%;压缩机排汽温度平均值为 101.1℃,波动范围 0.8%;整体看来系统运行较为稳定,可靠性较高。



1—蒸发温度;2—压缩机排汽温度

图 3 温度随系统运行时间变化



1—进料流量;2—冷凝水流量

图 4 流量随系统运行时间变化

#### 3.2 蒸发温度对系统蒸发量、运行能耗的影响

蒸发温度是 MVR 热泵系统的关键工艺参数,为了研究其对系统性能的影响,以蒸发温度为变量,通过理论计算与实验研究相结合的方法分析其对系统蒸发量、运行功率、处理效果、COP、SMER 等性能参数的影响规律。

图 5、图 6 所示分别为不同蒸发温度下系统蒸发量与运行功率随蒸发温度的变化趋势。随着蒸发温度的升高,系统蒸发量模拟值与实验值逐渐上升,

且拟合较好。蒸发温度越高,二次蒸汽密度越小,单位时间内压缩机吸、排汽质量流量升高,用于热交换的热量增多,故蒸发量上升;由于单位时间内有更多的二次蒸汽被压缩,因此蒸汽压缩机的功率随蒸发温度的升高逐渐增大,导致系统运行功率上升。此外,蒸发温度的升高有助于提升蒸发器换热系数,对于提高系统蒸发量也具有一定积极作用。

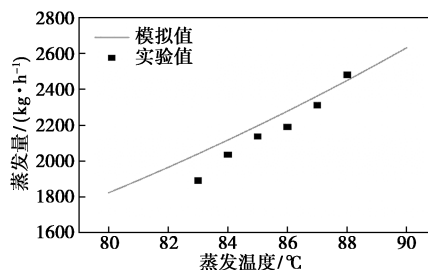


图 5 蒸发量随蒸发温度的变化

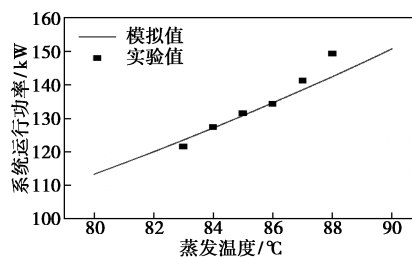


图 6 系统运行功率随蒸发温度的变化

#### 3.3 蒸发温度对 COP、SMER 的影响

基于蒸发量与运行功率的变化情况,对不同蒸发温度下 COP 与 SMER 进行计算,分别如图 7、图 8 所示。由图可知,系统 COP、SMER 的模拟值与实验值均随蒸发温度的升高而逐渐增大。蒸发温度升

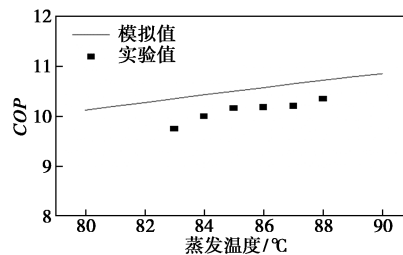


图 7 COP 随蒸发温度的变化

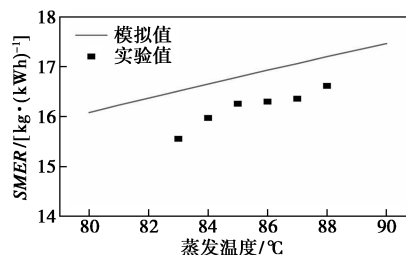


图 8 SMER 随蒸发温度的变化

高,系统蒸发量与运行功率也随之增大,但是蒸发量增加幅度要大于功率的增加,因此 COP、SMER 随蒸发温度的升高而增大。

### 3.4 蒸发温度对去除率的影响

在不同蒸发温度下,对蒸发冷凝液进行水质分析,获得不同蒸发温度下 TDS 及 COD 去除率的变化规律,如图 9 所示。当蒸发温度由 83℃ 上升至 85℃ 时,COD 去除率变化不大,约为 92%;随着蒸发温度继续升高,较高的温度促使废水中部分有机物受热分解,随着二次蒸汽进入冷凝液,导致 COD 去除率明显降低,因此,85℃ 时去除率达到最大值。此外,TDS 去除率随蒸发温度的升高几乎没有变化,大约为 99%,主要由于二次蒸汽夹带微小液滴所造成。

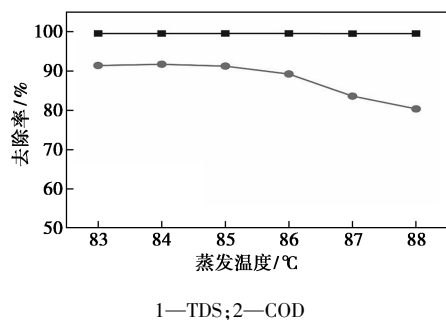


图 9 去除率随蒸发温度的变化

### 3.5 系统运行经济性分析

在相同条件下,将 MVR 蒸发结晶系统与传统多效系统进行运行经济性对比分析。多效蒸发加热蒸汽消耗量计算方法如式(10)所示:

$$m_{\text{steam}} = m_v / 0.85n_{\text{effect}} \quad (10)$$

式中, $m_v$  为系统蒸发量, $n_{\text{effect}}$  为多效蒸发系统效数。

以蒸发温度为 85℃ 时运行工况为例,开发的 MVR 蒸发结晶系统蒸发吨水电耗约为 63 kWh。为了便于比较,进行标煤与运行费用折算,如表 4 所示。

表 4 不同蒸发形式下蒸发吨水标煤消耗及运行费用对比

蒸发形式	单效	双效	三效	四效	MVR
标煤消耗量对比					
标煤消耗量/kg	159.5	108.8	58.0	43.5	25.5
MVR 对于多效蒸发标煤	84.0	76.6	56.0	41.4	0
节约百分比/%					
运行费用对比					
蒸发吨水费用/元	198.0	135.0	72.0	54.0	44.1
MVR 对于多效蒸发运行	77.7	67.3	38.8	18.3	0
费用节约百分比/%					

注:1 kWh 电量等价热量约为 0.404 kg 标煤,1 kg 饱和蒸汽等价热量约为 0.145 kg 标煤<sup>[16]</sup>。

采用 MVR 热泵技术可比三效、四效蒸发分别节约标煤 56.0%、41.4%,节约运行费用 38.8% 和 18.3%,表明 MVR 热泵技术在提升能源利用率、降低企业运行成本方面有着巨大潜力。

## 4 结论

为研究 MVR 热泵技术在高盐废水蒸发结晶过程的适用性,以羟丙基甲基纤维素(HPMC)生产过程产生的高盐废水为实验工质,通过理论分析与实验研究结合的方式进行系统特性分析,得到以下结论。

(1)开发的 MVR 热泵蒸发结晶系统运行稳定,可靠性较高,各项工艺参数波动较小;当蒸发温度为 85.2℃ 时,系统平均蒸发量为 2 137 kg/h,达到设计要求。

(2)蒸发温度对废水处理前后 TDS 的去除率几乎没有影响,但较高的蒸发温度会促使废水中有机物受热分解,导致 COD 去除率下降。

(3)系统蒸发量、运行功率、COP、SMER 受蒸发温度影响较为明显,随着蒸发温度的升高呈现逐渐上升趋势,且理论值与实验值拟合较好。

(4)开发的 MVR 热泵蒸发结晶系统节能效果较为显著,相比传统三效或四效蒸发可分别节约标煤 56.0%、41.4%,节约运行费用 38.8% 和 18.3%。

## 参考文献

- [1] 韦锋涛,贾铭椿,王晓伟,等.高含盐废水浓缩处理技术研究进展[J].现代化工,2019,39(9):21-25.
- [2] 乔鑫龙,方梦祥,岑建孟,等.萃取法处理含酚废水的研究进展[J].水处理技术,2016,42(4):7-11,16.
- [3] 翟廷婷,朱兆坚,王宁,等.树脂吸附法深度处理矿井水中氟化物的研究[J].环境科技,2018,31(6):6-10.
- [4] 孙怡,于利亮,黄浩斌,等.高级氧化技术处理难降解有机废水的研发趋势及实用化进展[J].化工学报,2017,68(5):1743-1756.
- [5] 袁惠新,金澄澄,付双成.蒸发技术在高含盐废水处理中的研究进展[J].现代化工,2017,37(5):50-54.
- [6] 乌云,杨鲁伟,张振涛,等.高含盐有机废水蒸发浓缩分离特性实验研究[J].环境工程,2015,33(8):8-12,31.
- [7] 梁林,韩东.蒸汽机械再压缩蒸发器的实验[J].化工进展,2009,28(S1):358-360.
- [8] Ye Z L, Hong Y, Pan S, et al. Full-scale treatment of landfill leachate by using the mechanical vapor recompression combined with coagulation pretreatment [J]. Waste Management, 2017, 66:88.

(下转第 220 页)

不大。对比而言,高温焙烧再生分子筛脱醛效果差,这归因于焙烧温度偏高,脱除水分及醛的同时也会一定程度上引起疏水改性的三甲基硅氧烷流失及部分孔道的坍塌,从而影响再次吸附脱醛。总体而言,采用过热水蒸汽脱附再生效果更好。

表 4 改性分子筛再生效果评价

再生方式	剩余醛含量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	比表面积/ ( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	孔容/ ( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )	孔径/ nm
原改性分子筛	4.11	473	0.080	2.3
高温煅烧再生	7.27	419	0.082	2.9
降压脱附再生	22.4	469	0.078	2.3
过热水蒸汽再生	4.23	469	0.079	2.3

### 3 结论

(1)通过 FT-IR 红外光谱和 XRF 对某环氧乙烷装置聚合物进行分析,得出该聚合物中 99.8% 的物质为不同聚合度的  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ , 剩余 0.2% 为 Na、K、Cl 等杂质。

(2)以配置的含甲醛环氧乙烷水溶液为研究对象,筛选发现改性 ZSM-5 分子筛吸附甲醛性能最佳。

(3)以工业装置 T320 处环氧乙烷为处理对象,在床层温度  $25^\circ\text{C}$ 、压力 1 MPa 和空速  $10\text{ h}^{-1}$  条件下,流出液体积为床层体积 100 倍时,T320 工段醛含量由处理前的  $27.47\text{ mg/L}$  降低到  $4.11\text{ mg/L}$ ;吸附了 3 000 倍吸附剂体积后的改性分子筛仍有较好的吸附效果,流出液醛含量仍保持在  $6\text{ mg/L}$  以下;对吸附饱和的分子筛进行再生处理,以过热水蒸汽再生效果最佳,再生后的分子筛与原分子筛吸附性能相当。

### 参考文献

[1] 王炜,李金.乙烯制环氧乙烷技术进展[J].乙烯工业,2020,32(1):11-14,19.

- [2] 杨挺,程丽鸿,钱丹.我国聚乙烯发展现状及市场分析[J].绝缘材料,2013,46(3):33-36,44.
- [3] 刘轶.氯化聚乙烯的发展现状及分析[J].现代塑料加工应用,2010,(3):62-63.
- [4] 崔小明.环氧乙烷生产技术进展及市场分析[J].精细与专用化学品,2014,(5):12-18.
- [5] 倪小峰,丁国荣,孙志刚,等.国内环氧乙烷供需分析及技术进展[J].化学工业,2021,39(4):76-81.
- [6] Martins L, Cardoso D. Production of ethyleneglycols and derivatives by catalytic reactions of ethylene oxide[J]. Quimica Nova, 2005, 28(2):264-273.
- [7] 郑宁来.扬子石化环氧乙烷精制系统优化改造[J].石油炼制与化工,2017,(6):97-97.
- [8] 于剑昆.扬子石化 18 万 t/a 环氧乙烷装置建成投产[J].化学推进剂与高分子材料,2013,11(5):37-37.
- [9] Bergh S, Cong P, Ehnebuske B, et al. Combinatorial heterogeneous catalysis: Oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene, selective oxidation of ethane to acetic acid, and selective ammoxidation of propane to acrylonitrile[J]. Topics in Catalysis, 2003, 23(1):65-79.
- [10] 张媛媛.疏水性硅基吸附剂的制备及 VOCs 吸附性能研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [11] 韩佳颐,侯永江,左欠,等.ZSM-5 分子筛疏水改性及催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化苯酚的性能研究[J].安全与环境工程,2017,24(3):91-96.
- [12] 张晓静,刘雁,陈永生.负载型 ZSM-5 分子筛催化剂再生方法研究[J].工业催化,2008,16(6):23-26.
- [13] 刘欣萍,洪爱珠,颜桂扬,等.失活 V-P/HZSM-5 分子筛的再生及催化性能研究[J].福建师范大学学报:自然科学版,2010,26(1):69-72.
- [14] McGill P R, Sohnel T. A study of gas phase and surface formaldehyde polymerisation from first principles [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(2):858-868.
- [15] 徐涛,刘晓勤,刘定华,等.吸附剂的改性及脱除乙二醇中微量杂质[J].化工进展,2006,25(10):1158-1161.
- [16] 何明阳,陈群,朱晔,等.一种催化加氢法精制乙二醇的催化剂:CN101032688[P].2007-09-12.
- [17] 曹玉霞,孙家兴,何明阳,等.提高乙二醇 UV 值的加氢催化剂研制[J].化工进展,2007,26(11):1636-1640. ■

(上接第 215 页)

[9] 姜华,张子尧,宫武旗.MVR 并联双效蒸发结晶系统设计及研究[J].化工进展,2019,38(10):4461-4469.

[10] 谢进祥.离心式压缩机的性能测试与计算[J].风机技术,2006,(2):6-9.

[11] 中华人民共和国化工部.HG/T 20570—95.工艺系统工程设计技术规定[s].

[12] 李金.聚合物改性剂改良透水混凝土性能试验研究[D].绵阳:西南科技大学,2017.

- [13] 房瑜红,张光华.纤维素醚的特性及其在造纸工业中的应用[J].陕西科技大学学报,2006,(4):143-147.
- [14] 武慧超,杜守颖,陆洋,等.药用辅料羟丙基甲基纤维素在制剂中的应用[J].中国实验方剂学杂志,2013,(17):370-375.
- [15] 侯超,张振涛,杨鲁伟,等.中药提取液蒸发浓缩过程采用机械蒸汽再压缩技术特性研究[J].现代化工,2016,36(11):172-174.
- [16] 高丽丽,张琳,杜明照.MVR 蒸发与多效蒸发技术的能效对比分析研究[J].现代化工,2012,32(10):90-92. ■