



多效 MVR 蒸发浓缩水处理系统研究

沈九兵, 谭牛高, 肖艳萍, 李志超

(江苏科技大学能源与动力学院, 江苏镇江 212100)

[摘要] 基于自热回收技术的多效 MVR 蒸发浓缩水处理系统是降低零液排放成本的有效技术方法。设计了带有过热消除器和新鲜蒸汽补给的多效 MVR 系统, 利用 Aspen Plus 系统仿真软件进行了模型建立与验证, 并以氯化钙溶液为例, 对各效 MVR 系统进行了仿真研究与分析。能耗分析表明, 多效 MVR 系统的压缩机功率随效数的增加而降低, 多效 MVR 系统的新鲜蒸汽消耗量随效数的增加而增加; 经济性分析表明, 综合各效 MVR 系统的复杂程度、操作控制难度、初期投资成本和运行成本, 二效 MVR 系统将是一个比较好的选择; 采用能量增益效率 GOR_{MVR} 作为热力学效率指标对各效 MVR 系统进行衡量, 结果表明增加系统效数, 系统 GOR_{MVR} 会降低。基于以上分析结果, 提出多效 MVR 系统耦合新能源蒸汽发生装置将是未来零液排放水处理技术较好的发展方向。

[关键词] 零液排放; 多效 MVR; Aspen Plus; 经济性分析; GOR_{MVR}

[中图分类号] TQ028.61 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)07-0147-07

Study on multi-effect MVR evaporation concentrated water treatment system

SHEN Jiubing, TAN Niugao, XIAO Yanping, LI Zhichao

(School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: The multi-effect MVR evaporation and concentration water treatment system based on self-heat recovery technology is an effective technical method to reduce the cost of zero liquid discharge. A multi-effect MVR system with superheater eliminator and fresh steam supply was designed. The model was established and verified by using Aspen Plus system simulation software. Taking calcium chloride solution as an example, the simulation research and analysis of each effect MVR system were carried out. The energy consumption analysis showed that the compressor power of multi-effect MVR system decreased with the increase of effect number, and the fresh steam consumption of multi-effect MVR system increased with the increase of effect number. The economic analysis showed that considering the complexity, operation control difficulty, initial investment cost and operation cost of multi-effect MVR system, the two-effect MVR system would be a better choice. Using the energy gain efficiency GOR_{MVR} as the thermodynamic efficiency index to measure the multi-effect MVR system, the results showed that the GOR_{MVR} of the system would decrease with the increase of effect number. Based on the above analysis results, it was proposed that the multi-effect MVR system coupled with new energy steam generator would be a better development direction of zero liquid discharge water treatment technology in the future.

Key words: zero liquid discharge; multi-effect MVR; Aspen Plus; economic analysis; GOR_{MVR}

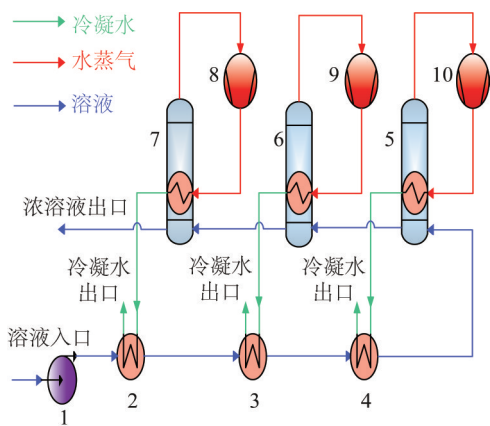
近年来我国工业蓬勃发展, 对水资源的消耗越来越大, 且工业生产过程中会排放大量的高盐废水, 其成分复杂, 常含有 Cu^{2+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 等离子, 如排至环境将会对水资源造成严重的污染^[1-3]。零液排放(ZLD)是一种处理工

业废水的新兴技术, 其能最大限度地减少废物排放, 回收资源, 还能减轻淡水消耗对生态系统造成的压力, 是一种实现工业可持续性发展的良好途径^[4-5]。ZLD 流程的实际配置可以包括 4 个步骤^[6-7]: 物理/化学预处理、蒸发器浓缩、结晶器形成晶体、固液分离

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(52006092)

装置分离晶体。虽然ZLD技术能够最大限度地减少对水源的污染并扩大供水,但由于极高的成本和巨大的能源消耗,其工业规模的应用受到限制。Runyao HUANG等^[3]以“碳达峰”为背景,对我国长三角地区污水处理厂的能源效率和处理技术差异进行了系统评价,结果表明我国很多污水处理厂在能源利用效率上仍然有很大的提升空间。

基于自热回收技术(SHRT)的机械蒸汽再压缩(MVR)系统具有较高的节能效率,能够将排放的余热完全回收再利用,在针对不同工业废水的实验过程中取得较好的效果^[8-10]。由于溶液浓度增加,溶液的沸点升高(BPE)也会随之增加^[11],为保障一定的传热温差,单效/级MVR系统运行成本也会增加,受此影响,单效/级MVR系统仅在浓缩溶液中溶质最终质量分数小于6%的领域得到了广泛应用^[12]。对于处理高浓度工业废水的蒸发系统,目前大多数都含有多个水蒸气压缩机^[12-16],构建的系统是由单级MVR系统串联而成,以三级MVR系统为例,其工艺流程见图1。虽然这些系统处理工业废水能耗都比单级MVR系统低,但由于系统中水蒸气压缩机数量增多,系统的造价比较昂贵。



1—离心泵;2~4—预热器;5~7—蒸发器;8~10—水蒸气压缩机

图1 三级MVR系统

Fig. 1 Three level MVR system

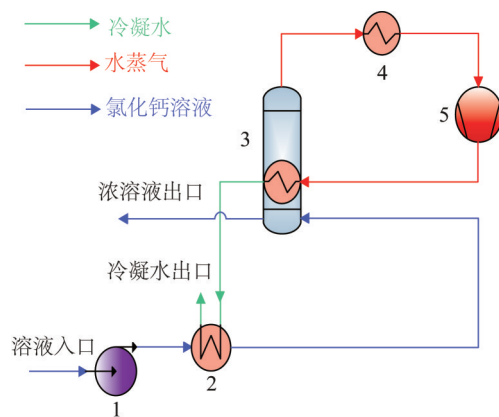
以SHRT作为设计思路,结合多效蒸发(MEE)系统多次循环利用自身热量的优势和单级MVR系统余热再回收的技术,在仅使用1台水蒸气压缩机的前提下设计了单效至五效多个MVR系统,以高BPE氯化钙溶液作为处理液,基于当下热力系统理论研究常用的Aspen Plus系统仿真软件^[17-20],对各系统进行了变工况研究与分析,旨在为研发处理高浓度工业废水的多效MVR系统提供理论参考,同时

给出设计优化方向。

1 多效MVR系统及其仿真模型

1.1 多效MVR系统原理

图2为一效MVR系统的运行原理,溶液由离心泵泵入预热器,被冷凝水预热后进入蒸发器,蒸发器内的溶液吸热后产生二次蒸汽,二次蒸汽经过热消除器消除过热后进入压缩机,升温升压后进入蒸发器内冷凝释放热量,形成的冷凝水经预热器排出系统。



1—离心泵;2—预热器;3—蒸发器;4—过热消除器;5—水蒸气压缩机

图2 一效MVR系统

Fig. 2 One-effect MVR system

图3为三效MVR系统,其示意了多效MVR系统流程。与图1所示的多级MVR系统不同,多效MVR蒸发器的运行压力逐级递减,且多效MVR系统只在末级设置水蒸气压缩机,将末级蒸发器产生的二次水蒸气升温升压后送入第一效蒸发器。一效至五效MVR系统的区别仅在于蒸发器的数量不一样。图3中a、b、b'、c等示意了各流股的焓,相应的三效MVR系统内水蒸气的压焓见图4。

由图4可知,由于水蒸气的液化潜热随压力升高而降低,即一定量高压饱和蒸汽冷凝释放的潜热在一定传热温差下不能得到等量的低压二次蒸汽,因此三效MVR系统中3个蒸发器蒸发水量随压力降低逐一递减,经末级蒸发器生产的二次蒸汽经压缩机升温升压后不能满足第一蒸发器的热量需求,故系统中设置了新鲜蒸汽的补偿入口。

在蒸发浓缩过程中,溶液的BPE随溶液浓度增加而增加,产生的蒸汽也处于过热状态^[13],因此,多效MVR系统入口都设置了过热消除器,将压缩机吸

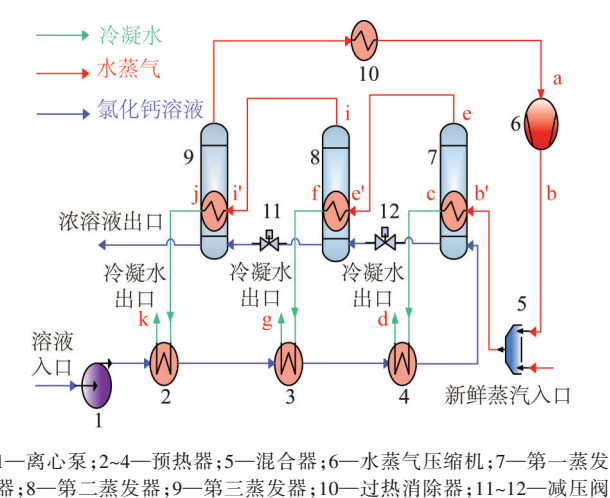


图3 三效MVR系统

Fig. 3 Three-effect MVR system

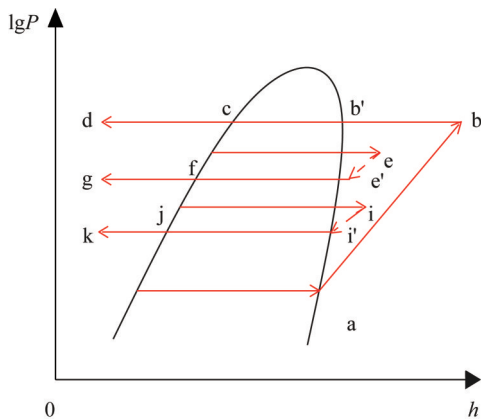


图4 三效MVR系统水蒸汽压焓

Fig. 4 Water vapor pressure-enthalpy diagram of three-effect MVR system

气温度降至饱和温度,达到节约压缩机能耗、提高压缩机能效的目的。

1.2 多效MVR系统仿真模型

利用 Aspen Plus 软件可建立系统的多效 MVR 仿真模型,具体见图5。

如图5所示,系统蒸发器的数量为3个,对应三

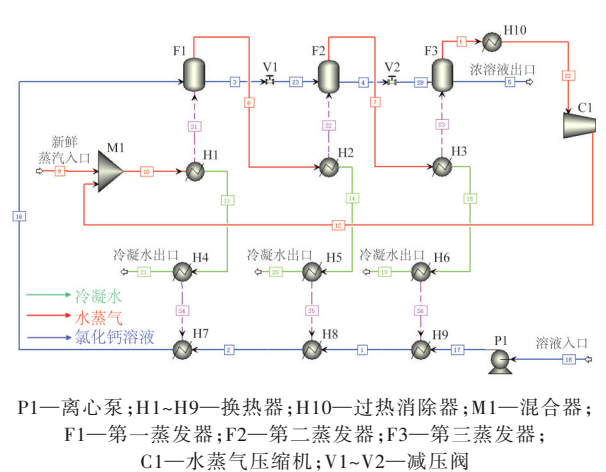


图5 三效MVR模拟图

Fig. 5 Three-effect MVR simulation diagram

效MVR系统,单效至五效的模型区别仅为对应的蒸发器数量不同。系统进行仿真模拟时,在软件工艺流程选项中选择设计规范选项,定义溶液出口溶质的质量分数为自变量,新鲜蒸汽入口流量为因变量,模拟系统会根据溶液出口溶质的质量分数自动调节新鲜蒸汽的入口流量,保证有足够流量的水蒸气提供热量给蒸发器,并且合理分配每个蒸发器的蒸发水量,使蒸发器蒸发的二次蒸汽能够满足下一蒸发器蒸发水量所需的热量需求,保证最后一个蒸发器浓溶液出口溶质的质量分数满足预设的参数。

2 多效MVR系统仿真模型验证

多效MVR系统进行仿真模拟时,需假设:(1)系统在稳态条件下运行;(2)预热器、蒸发器以及管路的热量损失忽略不计;(3)忽略管路的压降和泵的功耗;(4)MVR系统仿真中,压缩机效率设定值范围为0.7~0.8^[21~23],本系统仿真时压缩机效率设为0.72。

为验证系统仿真模型的可行性和准确性,将本研究一效MVR系统模型的仿真结果与文献[9]的实验数据进行了对比分析,结果见表1。

表1 模拟结果和实验结果与设计参数对比											
Table 1 Comparison between simulation results, experimental results and design parameters											
项目	进料流量/ (kg·h ⁻¹)	进料质量 分数/%	进料温 度/℃	冷凝温 度/℃	出料质量 分数/%	蒸发水量/ (kg·h ⁻¹)	沸点温 升/℃	蒸发侧压 力/kPa	冷凝侧压 力/kPa	传热温 差/℃	压缩机功 率/W
设计参数	25	2	78	86	10	20	1	47.37	60.12	5	307
实验结果	24	2	78	86.3	10	20	1	48.55	61.8	5.2	1 000
模拟结果	25	2	78	85.98	10	19.7	1	47.37	60.12	5.17	307
实验与设计参数误差/%	4	0	0	0.34	0	0	0	2.5	2.8	4	326
模拟与设计参数误差/%	0	0	0	-0.02	0	-1.5	0	0	0	3.4	0

从表1可以看出,在相同设计参数的条件下,本模拟结果和实验结果的误差均在较小的范围内,由此可见,建立的系统模型能够在一定的误差范围内对系统的蒸发浓缩进行模拟。实验过程中压缩机功耗与设计值及仿真结果误差均较大,原因在于实验用的压缩机额定功率为4 kW,与设计参数偏差较大,较大的压缩机尺寸导致气体泄漏量、摩擦、散热等不可逆损失增大。

3 多效 MVR 系统模拟参数设定

将多效 MVR 系统处理的溶液设为氯化钙溶液,不同压力条件下氯化钙溶液泡点温度随溶液中氯化钙质量分数的变化见图6。

由图6可知,当氯化钙质量分数大于30%时,溶液的BPE迅速升高,若进一步对溶液进行蒸发浓缩,蒸汽与溶液的传热温差会明显增大,MVR系统的节能优势降低。因此,本MVR系统进行氯化钙溶液处理时,设定溶液中氯化钙的目标质量分数为30%。笔者主要对热基ZLD技术中蒸发器浓缩过程进行分析,浓溶液结晶的过程和晶体分离步骤不进行讨论。

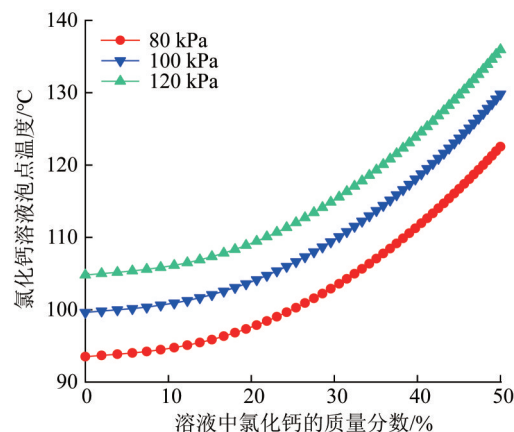


图6 氯化钙溶液泡点温度与溶液中氯化钙质量分数的关系

Fig. 6 Relationship between bubble point temperature of calcium chloride solution and mass fraction of calcium chloride in solution

用Aspen Plus模拟时选择电解质向导,可以快速生成电解质体系的组分和反应。物性计算在Aspen Plus中选择ELECNRTL物性方法。多效MVR系统各蒸发器之间设置的压差能够满足蒸发器内蒸发和冷凝的最小温差大于5℃。溶液入口氯化钙质量分数设为3%,温度为25℃,流量为1 000 kg/h,压力参数见表2。

表2 仿真过程主要的压力参数设定值

Table 2 Set values of main pressure parameters in the simulation process

参数	一效 MVR 系统	二效 MVR 系统	三效 MVR 系统	四效 MVR 系统	五效 MVR 系统
第一蒸发器压力/kPa	50	85	105	130	150
第二蒸发器压力/kPa	—	50	85	105	125
第三蒸发器压力/kPa	—	—	50	85	100
第四蒸发器压力/kPa	—	—	—	50	80
第五蒸发器压力/kPa	—	—	—	—	50
新鲜饱和蒸汽压力/kPa	—	105	130	156.5	182.5

4 多效 MVR 系统模拟结果分析

4.1 多效 MVR 系统能耗分析

压缩机能耗和新鲜蒸汽消耗是决定多效 MVR 系统运行能耗的主要因素,根据上述参数设定,对一效至五效 MVR 系统进行了仿真模拟,得到各效系统能耗情况,如图7所示。

由图7可知,压缩机的运行功率随着 MVR 系统效数的增加逐渐降低,但是降低的幅度逐渐减小。这是由于随着效数的增加,多效 MVR 系统利用 SHRT 优势通过蒸发器之间的压差蒸发了一部分水,导致末级蒸发器出口的二次蒸汽量减小,虽然随着效数的增加蒸汽压缩的压比会增加,但压缩机功

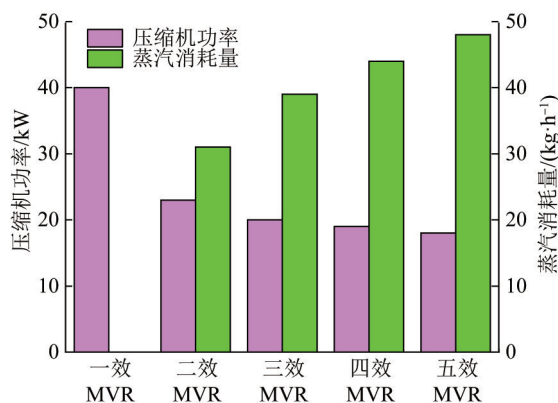


图7 多效 MVR 模拟运行结果

Fig. 7 Multi-effect MVR simulation operation results

率还是在降低。

此外,一效MVR系统不需要额外消耗新鲜蒸汽,多效MVR系统的新鲜蒸汽消耗量从二效开始随着效数的增加逐渐增大,但是增加幅度不大。这是由于随着效数的增加,进入压缩机再压缩的二次蒸汽流量不断降低,压缩机功率降低,提供给第一蒸发器的热量逐渐降低,因此需提高新鲜蒸汽流量对系统进行热量补充。

4.2 多效MVR系统的经济性分析

定义多效MVR系统运行费用如式(1)所示。

$$p_{\text{运行}} = c_{\text{蒸汽}} \times q_m + c_{\text{电}} \times w_{\text{压}} \quad (1)$$

式中: $p_{\text{运行}}$ ——系统运行费用,元/h;

$c_{\text{蒸汽}}$ ——新鲜蒸汽的单价,元/kg;

q_m ——新鲜蒸汽流量,kg/h;

$c_{\text{电}}$ ——电费单价,元/(kW·h);

$w_{\text{压}}$ ——压缩机功率,kW。

我国不同地区的工业电费和工业水蒸汽的价格有浮动,电费的浮动区间在0.7~1元/(kW·h),工业水蒸汽的价格浮动区间在150~250元/t。为了对多效MVR系统运行费用进行准确预估,把电费和工业水蒸汽价格划分成4种组合,如表3所示。

表3 电费和工业水蒸汽价格4种方案组合

Table 3 Combination of four schemes of electricity charge and industrial steam price

方案	1	2	3	4
水蒸气价格/(元·t ⁻¹)	150	250	150	250
电费/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.7	0.7	1	1

将多效MVR系统在传热 $\Delta T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的运行工况数据代入式(1),得到图8所示的结果。由图8可知,对于4种不同的价格组合,二效至五效MVR系统都比一效MVR系统节省运行费用,且二效至五效MVR系统的运行费用在4种价格组合中都非常接近。虽然三效至五效MVR系统多数组合情况下比二效MVR系统的运行费有少许下降,综合各效MVR系统的复杂程度、操作控制难度、初期投资成本和运行成本,二效MVR系统仍将是一个比较好的选择。

4.3 多效MVR系统能量增益性能分析

为评价多效MVR系统的热力学效率,笔者参考用于评价多效蒸发MEE系统性能的能量增益效率 $\text{GOR}^{[24]}$ 定义,提出了新的 GOR_{MVR} 指标,用来衡量多

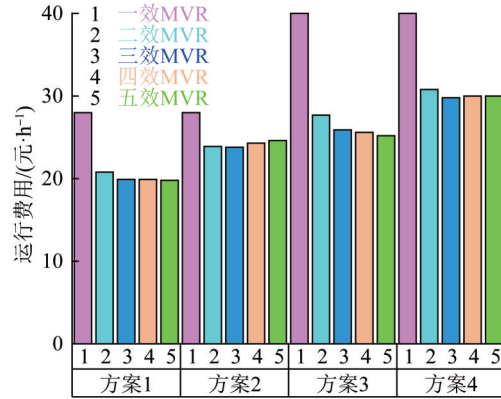


图8 多效MVR系统经济性分析

Fig. 8 Economic analysis of multi-effect MVR system

效MVR系统方案优越程度,具体见式(2)。

$$\text{GOR}_{\text{MVR}} = \frac{m_d}{m_s + m_q} \quad (2)$$

式中: m_d ——系统蒸发水量,kg/h;

m_s ——折算后的新鲜蒸汽流量,kg/h;

m_q ——压缩机功率折算后的蒸汽流量,kg/h。

m_s 和 m_q 的计算方法分别见式(3)、式(4)。

$$m_s = \frac{Q_1 + Q_2}{q_3 + q_4} \quad (3)$$

$$m_q = \frac{P \times 3600}{q_3 + q_4} \quad (4)$$

式中: Q_1 ——新鲜蒸汽冷凝过程释放的潜热,kJ/h;

Q_2 ——新鲜蒸汽冷凝后释放的显热,kJ/h;

q_3 ——单位质量溶液吸收的潜热,J/g;

q_4 ——单位质量溶液吸收的显热,J/g;

P ——压缩机功率,kW。

Q_1 、 Q_2 、 q_3 、 q_4 对应的计算分别见式(5)~式(8)。

$$Q_1 = m_1 \times r_1 \quad (5)$$

$$Q_2 = m_1 \times C_{p1} \times \Delta T_1 \quad (6)$$

$$q_3 = r_2 \quad (7)$$

$$q_4 = C_{p2} \times \Delta T_2 \quad (8)$$

式中: m_1 ——系统消耗新鲜蒸汽量,kg/h;

r_1 ——新鲜蒸汽的汽化潜热,J/g;

C_{p1} ——水的定压比热容,kJ/(kg·K);

ΔT_1 ——饱和水冷却到过冷水之间的温差,K;

r_2 ——单位质量溶液蒸发所需的潜热,J/g;

C_{p2} ——溶液的定压比热容,kJ/(kg·K);

ΔT_2 ——溶液入口温度到饱和溶液之间的温差,K。

调整多效MVR系统仿真模拟时的蒸发冷凝传热温差,将仿真结果代入上述一系列公式,得到多效

MVR系统的 GOR_{MVR} ,结果见图9。

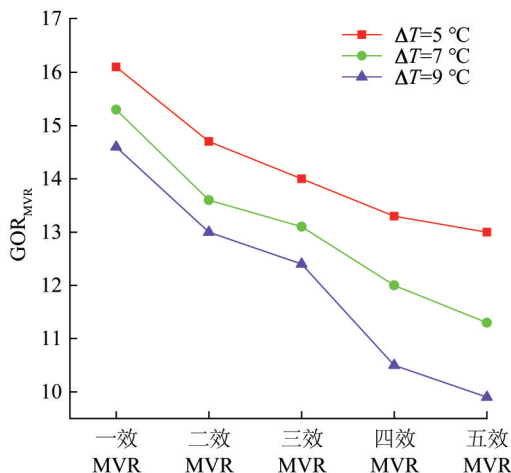


图9 多效MVR系统 GOR_{MVR} 分析

Fig. 9 GOR_{MVR} analysis of multi-effect MVR system

由图9可知,相同温差下,一效MVR的 GOR_{MVR} 指标最高,说明一效MVR的能量增益比最大,它能够充分利用自身的热量多次重复蒸发溶液的水分;相同温差下, GOR_{MVR} 指标随着系统效数的增加而逐级减小,虽然多效MVR系统消耗的压缩机能耗随着效数的增加逐渐减小,但是需要补充的新鲜蒸汽量却逐渐增大,导致在用 GOR_{MVR} 来表征系统增益比的时候明显多效MVR不如一效MVR系统;不同温差下,各效系统随着传热温差的增大 GOR_{MVR} 指标迅速下降,这是由于各效MVR消耗的电功和新鲜蒸汽量都随着传热温差增大而迅速增大。

GOR_{MVR} 指标越低说明系统能量的增益效果越差。虽然用经济性对多效MVR系统进行分析时多效MVR系统能更好地降低运行成本,但是新鲜蒸汽也需要消耗大量的能源。单纯用经济性对热基ZLD系统分析不符合我们国家节能减排和“碳中和”的宏伟目标,但工业上追求低成本的运行目标也不应该被忽略。对此,可以通过利用太阳能、风能、波浪能、生物质能等能源来产生蒸汽,这样既不消耗高品位的能量来产生蒸汽,又能够利用这些蒸汽降低多效MVR系统蒸发浓缩高盐废水热基ZLD系统的运行费用。国内外学者已经在海水淡化和废水蒸发处理系统中耦合新能源装置进行了很多实验,并取得了较好的实验成果^[25-29]。在多效MVR系统中耦合新能源蒸汽发生装置,将是多效MVR系统接下来的设计方向。

5 结论

针对现有多级串联的MVR水处理系统蒸汽压缩机数量多、系统造价昂贵的问题,同时为响应国家“双碳”计划,解决零液排放工艺过程中废水浓缩高成本的问题,进行了设有过热消除器和新鲜蒸汽补给的多效MVR蒸发浓缩水处理系统设计与仿真研究,结果表明:

(1)所建立的仿真模型的仿真结果与文献中的实验数据误差最高为3.4%,表明所建立的仿真模型能有效地用于多效MVR系统研究;

(2)综合各效MVR系统的复杂程度和运行成本,二效MVR系统将是工业废水蒸发浓缩的一个优选;

(3)提出新的 GOR_{MVR} 指标,用来衡量多效MVR系统方案优越程度,结果表明一效MVR系统的 GOR_{MVR} 最高,多效MVR系统的 GOR_{MVR} 将随着效数增加和传热温差的增大而下降。综合 GOR_{MVR} 和运行成本,在多效MVR系统中耦合新能源蒸汽发生装置将是多效MVR系统接下来的设计方向。

参考文献

- [1] VARIS O, VAKKILAINEN P. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century [J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2/3): 93-104.
- [2] 刘丹, 刘琼琼, 周滨, 等. 工业高盐废水零排放与资源化利用的研究进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(10): 19-22.
LIU Dan, LIU Qiongqiong, ZHOU Bin, et al. Research progress on zero discharge and utilization of high salinity industrial wastewater [J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(10): 19-22.
- [3] HUANG Runyao, SHEN Ziheng, WANG Hongtao, et al. Evaluating the energy efficiency of wastewater treatment plants in the Yangtze River Delta: Perspectives on regional discrepancies [J]. *Applied Energy*, 2021, 297(C): S0306261921005389.
- [4] ALNOURI S Y, LINKE P, EL-HALWAGI M M. Accounting for central and distributed zero liquid discharge options in interplant water network design [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 644-661.
- [5] TONG Tiezheng, ELIMELECH M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: Drivers, technologies, and future directions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13): 6846-6855.
- [6] AZIMIBAVIL S, JAFARIAN A. Heat transfer evaluation and economic characteristics of falling film brine concentrator in zero liquid discharge processes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285: 124892.
- [7] MANSOUR F, ALNOURI S Y, AL-HINDI M, et al. Screening and

- cost assessment strategies for end-of-pipe Zero Liquid Discharge systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179:460-477.
- [8] XU Jun, XIE Junxian, CHENG Zheng, et al. Source apportionment of pulping wastewater and application of mechanical vapor recompression: Environmental and economic analyses[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 292:112740.
- [9] ZHOU Yasu, SHI Chengjun, DONG Guoqiang. Analysis of a mechanical vapor recompression wastewater distillation system[J]. *Desalination*, 2014, 353:91-97.
- [10] YANG Junling, ZHANG Chong, ZHANG Zhentao, et al. Electroplating wastewater concentration system utilizing mechanical vapor recompression [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, 144(7):04018053.
- [11] ELSAYED M L, WU Wei, CHOW L C. High salinity seawater boiling point elevation: Experimental verification [J]. *Desalination*, 2021, 504:114955.
- [12] HAN Dong, HE Weifeng, YUE Chen, et al. Study on desalination of zero-emission system based on mechanical vapor compression[J]. *Applied Energy*, 2017, 185:1490-1496.
- [13] HAN Dong, YUE Chen, HE Weifeng, et al. Energy saving analysis for a solution evaporation system with high boiling point elevation based on self-heat recuperation theory [J]. *Desalination*, 2015, 355:197-203.
- [14] LIANG Lin, HAN Dong, MA Ran, et al. Treatment of high-concentration wastewater using double-effect mechanical vapor recompression[J]. *Desalination*, 2013, 314:139-146.
- [15] YUE Chen, WANG Bin, ZHU Banshou. Thermal analysis for the evaporation concentrating process with high boiling point elevation based exhaust waste heat recovery [J]. *Desalination*, 2018, 436:39-47.
- [16] 刘燕, 裴程林, 王建达, 等. 高沸点升溶液蒸发系统的设计与分析[J]. *过程工程学报*, 2017, 17(4):859-865.
- LIU Yan, PEI Chenglin, WANG Jianda, et al. Design and analysis of an evaporation system of solutions with high boiling point elevation[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2017, 17(4):859-865.
- [17] VON EIFF D, WONG P W, GAO Yonggang, et al. Technical and economic analysis of an advanced multi-stage flash crystallizer for the treatment of concentrated brine[J]. *Desalination*, 2021, 503:114925.
- [18] JIANG Jun, YANG Houwen, LIU Feng, et al. Analysis of thermal and water equilibrium and desulfurization efficiency after waste heat recovered from a wet flue gas desulfurization system[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2020, 15(2):e2413.
- [19] DOGBE E S, MANDEGARI M, GÖRGENS J F. Assessment of the thermodynamic performance improvement of a typical sugar mill through the integration of waste-heat recovery technologies [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 158:113768.
- [20] GAO Xiaoxin, GU Qiang, MA Jiangquan, et al. MVR heat pump distillation coupled with ORC process for separating a benzene-toluene mixture[J]. *Energy*, 2018, 143:658-665.
- [21] HAN Dong, HE Weifeng, YUE Chen, et al. Analysis of energy saving for ammonium sulfate solution processing with self-heat recuperation principle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1):641-649.
- [22] 裴程林, 赵桂锋, 张少峰, 等. 分级压缩 MVR 系统分析[J]. *节能*, 2018, 37(9):78-82.
- PEI Chenglin, ZHAO Guifeng, ZHANG Shaofeng, et al. Exergy analysis of hierarchical compression MVR system[J]. *Energy Conservation*, 2018, 37(9):78-82.
- [23] 姜华, 张子尧, 宫武旗. MVR 并联双效蒸发结晶系统设计与研究[J]. *化工进展*, 2019, 38(10):4461-4469.
- JIANG Hua, ZHANG Ziyao, GONG Wuqi. Design and research of MVR parallel double-effect evaporation crystallization system[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(10):4461-4469.
- [24] LI Yahui, ZHANG Xiaofei, WANG Yilin, et al. Feasibility study of multi-effect distillation dealing with high-salinity organic RO concentrates: Experiment and theoretical analysis [J]. *Desalination*, 2021, 505:115007.
- [25] LI Shuangfei, LIU Zhenhua, SHAO Zhixiong, et al. Performance study on a passive solar seawater desalination system using multi-effect heat recovery[J]. *Applied Energy*, 2018, 213:343-352.
- [26] ZEJLI D, OUAMMI A, SACILE R, et al. An optimization model for a mechanical vapor compression desalination plant driven by a wind/PV hybrid system[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11):4042-4054.
- [27] GUDE V G. Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources [J]. *Applied Energy*, 2015, 137:877-898.
- [28] MACEDONIO F, KATZIR L, GEISMA N, et al. Wind-aided intensified evaporation (WAIV) and membrane crystallizer (MCR) integrated brackish water desalination process: Advantages and drawbacks[J]. *Desalination*, 2011, 273(1):127-135.
- [29] ZHANG Xiaodong, HU Dapeng, LI Zhiyi. Performance analysis on a new multi-effect distillation combined with an open absorption heat transformer driven by waste heat[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(1):239-244.

[作者简介] 沈九兵(1987—), 副教授, 博士。E-mail: shenjiubing@just.edu.cn。

[收稿日期] 2022-04-13(修改稿)