

基于 TVR 和 MVR 热泵技术的 苦卤水双效蒸发工艺研究

杨德明*, 冷冰沁, 李涛, 娄超, 李铭
(常州大学石油化工学院, 江苏常州 213164)

摘要:针对苦卤水蒸发浓缩工艺高能耗、高成本的特点,将 TVR 与 MVR 2 种热泵节能技术应用于该工艺的节能研究,提出了 TVR 热泵及 TVR 耦合 MVR 热泵 2 种双效蒸发节能工艺。选用 ELECNRTL 电解质模型模拟该苦卤水体系,同时以能耗和年总费用(ATC)作为蒸发工艺的评价指标,对上述 2 种节能工艺进行模拟以及优化。研究表明,与常规双效蒸发工艺相比,TVR 热泵双效蒸发工艺能耗平均减少 61.5%,ATC 平均节省 70.3%;而 TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺能耗平均减少 71.4%,ATC 平均节省 69.3%。与 TVR 热泵双效蒸发工艺相比,TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺能耗平均减少 25.8%。由各自 ATC 计算结果可知,对于电力资源丰富的区域,选用 TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺较为合适,而对于淡水资源丰富的区域,选用 TVR 热泵双效蒸发工艺更为合适。

关键词:苦卤水;双效蒸发;TVR 热泵双效蒸发;MVR 热泵双效蒸发;年总费用;能耗

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)08-0230-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.08.046

TVR and MVR heat pump technologies based double-effect evaporation process for bittern

YANG De-ming*, LENG Bing-qin, LI Tao, LOU Chao, LI Ming

(School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In the light of the characteristics of bittern evaporation process, such as high energy consumption and high cost, thermal vapor recompression (TVR) heat pump and mechanical vapor recompression (MVR) heat pump technologies are both applied to conventional evaporation process. TVR heat pump double-effect evaporation process and TVR coupled MVR heat pump double-effect evaporation process are proposed for energy conservation. ELECNRTL electrolyte model is used to simulate this bittern system, and energy consumption and annual total cost (ATC) are chosen as objective functions to simulate and optimize these two processes. Study results show that compared with conventional double-effect evaporation process, TVR heat pump double-effect evaporation process can save energy consumption by 61.5% and ATC by 70.3%, respectively, and TVR coupled MVR heat pump double-effect evaporation process can save energy consumption by 71.4% and ATC by 69.3%, respectively. Compared with TVR heat pump double-effect evaporation process, TVR coupled MVR heat pump double-effect evaporation process save energy consumption by 25.8%. Considering ATC of each process, TVR coupled MVR heat pump double-effect evaporation process is more suitable for areas rich in power resources, and TVR heat pump double-effect evaporation process is more suitable for areas rich in water resource.

Key words: bittern; double-effect evaporation process; TVR heat pump; MVR heat pump; annual total cost; energy consumption

苦卤水是海水制盐过程的副产物,其中含有高浓度的钾盐和镁盐等有价值的矿物质。目前我国苦卤的利用率还不足 10%,造成资源的严重浪费,同时也对环境造成了污染^[1-2]。提取苦卤水中的钾盐和镁盐等需要蒸发大量的水分,因此苦卤水蒸发结晶过程能耗较大,同时生产成本较高,是制约苦卤水进一步综合利用的瓶颈^[3]。

提高二次蒸汽的压力和温度常用的有 2 种方法,一种是热力蒸汽再压缩(thermal vapour recom-

pression, TVR) 技术^[4-5],另一种则是蒸汽机械再压缩(mechanical vapor recompression, MVR) 技术^[6-7]。TVR 和 MVR 热泵技术均可以回收利用二次蒸汽,因此可以达到节能的目的。本文中借助 Aspen Plus 软件,对苦卤水蒸发浓缩工艺进行模拟与优化。在此基础上,把 TVR、MVR 等热泵节能技术应用于苦卤水的蒸发浓缩工艺,预期大幅度降低过程的能耗和操作费用,为苦卤水蒸发浓缩装置的节能改造或新建装置提供理论依据和基础数据。

收稿日期:2020-09-18;修回日期:2021-05-30

作者简介:杨德明(1966-),男,硕士,教授,主要从事分离工程与过程节能方面的研究工作,通讯联系人,0519-86330255;dmy216@163.com。

1 基础数据与评价模型

1.1 模拟规定

规定苦卤水的处理量为 45 t/h,进料为常温,其中 NaCl 质量分数为 0.065、KCl 为 0.031、MgSO₄ 为 0.085、MgCl₂ 为 0.082,其余为水。通过对苦卤水的蒸发浓缩,最终要求得到质量分数为 0.995 的 MgSO₄·H₂O 和 0.930 的 MgCl₂,其他为混合盐。

对于处理含有电解质的体系,通常采用 ELEC-NRTL 热力学方程进行模拟计算。ELEC-NRTL 是基于 NRTL 的热力学模型,除了考虑分子与分子间影响,还考虑了电解质与分子之间影响以及电解质与电解质之间的影响^[8]。该热力学方程采用 Electrolyte NRTL 计算液相活度系数,采用 Redlich-Kwong 方程计算气相逸度系数。模拟过程中,蒸发器、压缩机、热力喷射器及换热器分别采用 Flash2、Compr、MIX 和 Heater 模型进行计算。公用工程规定如下:冷却介质采用冷却水和冷冻盐水,冷却水进出口温度分别取 33、39℃;冷冻盐水进出口温度分别取-15、-10℃;加热介质采用压力为 0.4 MPa 的饱和蒸汽。

1.2 评价模型

以年总费用(ATC)作为各种蒸发工艺的综合技术经济评价指标。ATC 主要由设备投资费用(capital investment, CI)和操作费用(operation cost, OC)组成。由于设备投资费用主要考虑换热器和蒸汽压缩机等设备的固定投资费用;操作费用包

括水蒸汽、冷却水及电费,ATC 计算公式^[9]见式(1)~(8)。

$$ATC = OC + CI/\theta \tag{1}$$

$$OC = OC_s + OC_w + OC_M \tag{2}$$

$$CI = CI_H + CI_C \tag{3}$$

式中,θ 为设备的折旧年限,取 8;OC_s、OC_w 和 OC_M 分别为蒸汽、冷却水和电的操作费用;CI_H 和 CI_C 分别为换热器和压缩机的投资费用。

$$OC_s = \zeta_s \times Q_s / r_s \times 3\,600 \times 7\,200 / 1\,000 \tag{4}$$

$$OC_w = \zeta_w \times Q_c / (4.18 \times 6) \times 3\,600 \times 7\,200 / 1\,000 \tag{5}$$

$$OC_M = \zeta_M \times E_M \times 7\,200 \tag{6}$$

$$CI_H = 7\,296.0 \times A^{0.65} \tag{7}$$

$$CI_C = 0.9467 \times E_M^{0.62} \tag{8}$$

式中,A 为换热器的面积,m²;E_M 为蒸汽压缩机的电耗,kWh;ζ_s、ζ_w、ζ_M 分别为水蒸汽、冷却水、冷冻盐水和电的单价;Q_s、Q_c 分别为加热负荷、冷却负荷,kW。

2 常规双效蒸发工艺

目前,苦卤水的蒸发浓缩大多采用两次双效蒸发工艺^[10-13],典型的工艺流程见图 1。在 I 效蒸发系统中,得到合格的 MgSO₄·H₂O。I 效蒸发系统的浓缩液(温度约为 45℃)进入 II 效蒸发系统,得到合格的 MgCl₂^[14]。为有效利用 2 效二次蒸汽的热量,I 效和 II 效蒸发系统的进料均与 2 效二次蒸汽换热后进入各自的 1 效蒸发器,一定程度地减少了 1 效蒸发器的供热量,模拟结果汇总见表 1,为方便能耗的统一计算比较,将各种能耗均统一折算成标煤。

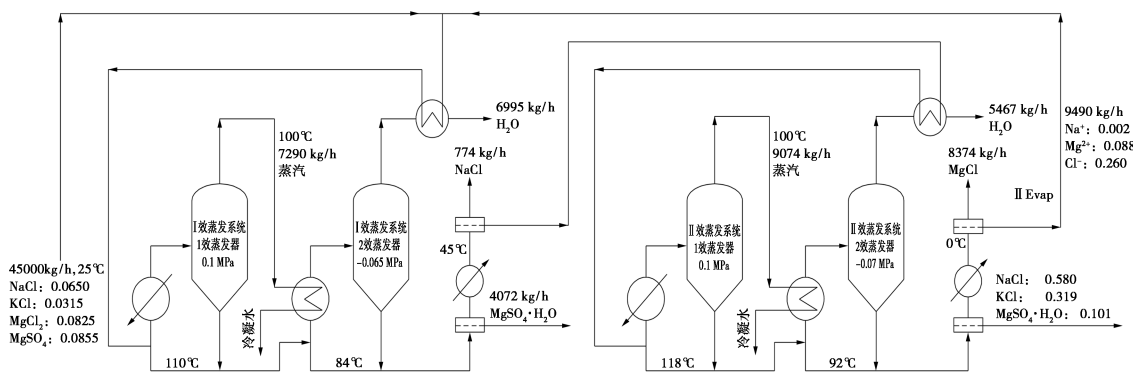


图 1 常规双效蒸发工艺流程

表 1 常规双效蒸发工艺模拟结果

项目	I 效蒸发系统		II 效蒸发系统	
	1 效蒸发器	2 效蒸发器	1 效蒸发器	2 效蒸发器
操作压力/MPa	0.10	-0.065	0.10	-0.07

二次蒸汽温度/℃	100	73	100	69
浓缩液温度/℃	110	84	118	92
蒸发负荷/kW	7345.6	3088.4	6661.0	3143.6
总能耗/kW	14006.6			
总能耗(标煤)/(t·a ⁻¹)	12407.8			

由表 1 可知,虽然 I 效和 II 效蒸发系统均采用双效蒸发工艺,但由于 2 效二次蒸汽的温位均较低,因此该二次蒸汽的有效利用率不高,导致装置能耗较大,达到 14 007 kW 左右。下面就如何充分利用这部分二次蒸汽进行节能研究。

3 节能蒸发工艺

常规双效蒸发工艺中,大部分 2 效二次蒸汽由于温位较低而无法得到充分的利用,因此如何充分利用这部分低温位的二次蒸汽及如何优化蒸发工艺是本装置节能的关键。而 TVR 及 MVR 热泵技术正是用于低温位蒸汽提质的有效节能手段,下面就以上 2 种热泵节能技术应用于苦卤水的蒸发浓缩,研究其节能效果。

3.1 TVR 热泵双效蒸发工艺

由于常规双效蒸发工艺中 2 效二次蒸汽的温度较低,因此进料如果仅通过二次蒸汽预热后的温升不大,从而导致双效蒸发系统的能耗居高不下。TVR 热泵技术是提高二次蒸汽温位的一种有效手段^[15],原理是高压蒸汽在进入文丘里喷射器后,在高流速作用下使文丘里喷射器内部形成负压,将 2 效二次蒸汽吸入并与其混合,经过热力压缩升温得到温位较高的蒸汽。图 2 为 TVR 热泵双效蒸发工艺流程,利用压力为 1.7 MPa 的高压蒸汽来引射二次蒸汽,提高二次蒸汽的压力和温度用以预热进料,从而有效地提高进料的预热温度,由此可减少蒸发系统的蒸汽用量,以达到节能的目的。鉴于高压蒸汽的费用要比低压蒸汽的费用高,为节省操作费用,

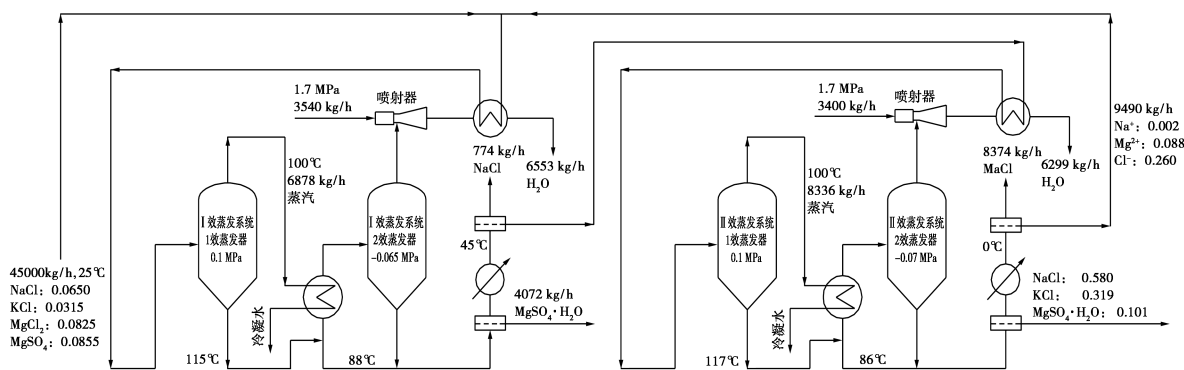
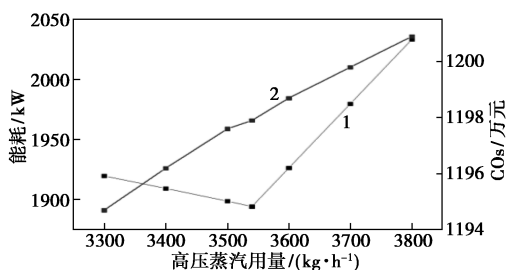


图 2 TVR 热泵双效蒸发工艺流程

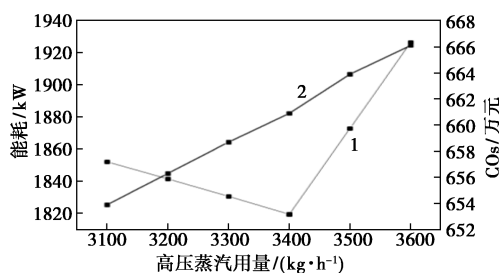
规定喷射器系统引射得到的混合蒸汽压力为 0.25 MPa,以此来确定高压蒸汽的用量。

本工艺的关键是要确定 I 效和 II 效蒸发系统中使用的高压蒸汽(动力蒸汽)的量^[16]。定义引射系数 ξ 为动力蒸汽与低压蒸汽(2 效二次蒸汽)流量的比值^[17],即 $\xi = Gh/Gp$,其中 Gh 为动力蒸汽流量, Gp 为低压蒸汽流量。 ξ 越大,二次蒸汽的利用率就越高,得到的混合蒸汽量就越多,则 I 效蒸发器消耗的新鲜蒸汽就越少。但如果 ξ 过大,则热负荷过量,会副产多余的混合中压蒸汽,导致过程的有效能损失增加,热力学效率下降,从节焓这个角度而言,是不经济的;再者,由于高压蒸汽和中压蒸汽存在价格差异,因此 ξ 也不是越大越好。图 3 为高压蒸汽用量与蒸发系统的能耗和蒸汽操作费用(OC_s)之间的关系。

由图 3 可知,随着高压蒸汽用量的增加, OC_s 呈规律性的上升趋势但相差不大。模拟结果表明,当一次蒸发系统中高压蒸汽量为 3 540 kg/h,二次蒸



(a) 一次蒸发系统



(b) 二次蒸发系统

1—能耗;2—CO₂s

图 3 高压蒸汽用量与能耗及费用的关系曲线

发系统中为 3 400 kg/h 时,2 个蒸发系统所需的热量恰好达到平衡,均没有副产多余的混合中压蒸汽,因此此时高压蒸汽的用量是最合适的,表 2 给出了 TVR 热泵双效蒸发工艺模拟结果。

表 2 TVR 热泵双效蒸发工艺模拟结果

项目	I 效蒸发系统		II 效蒸发系统	
	1 效蒸发器	2 效蒸发器	1 效蒸发器	2 效蒸发器
操作压力/MPa	0.10	-0.065	0.10	-0.07
二次蒸汽温度/℃	100	73	100	69
二次蒸汽量/(kg·h ⁻¹)	6878	6553	8336	6299
高压蒸汽量/(kg·h ⁻¹)	3540		3400	
引射系数 ξ	0.54		0.54	
蒸发负荷/kW	6099.3	3334.5	5862.5	3675.6
能耗/kW	2750.5		2641.7	
总能耗/kW	5392.2			
总能耗(标煤)/(t·a ⁻¹)	4776.7			

由表 1 和表 2 数据可知,在原双效蒸发工艺的

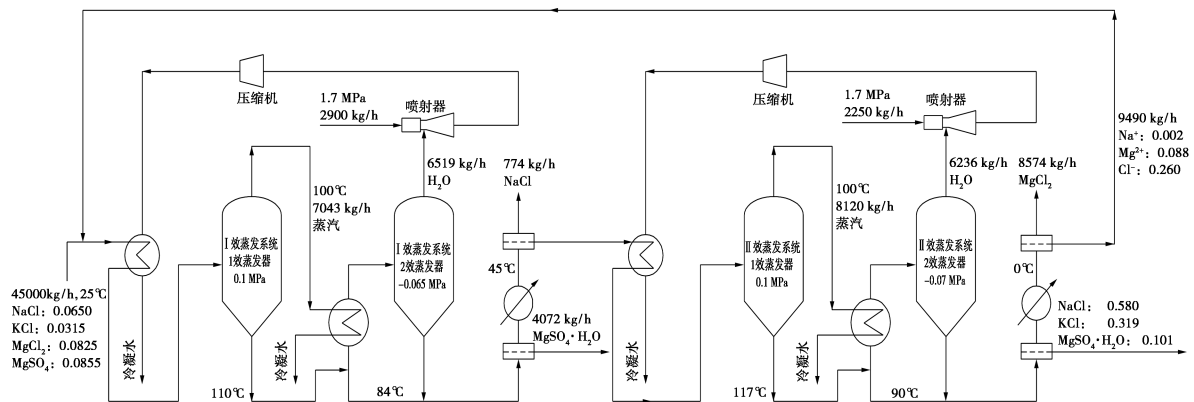


图 4 TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺流程

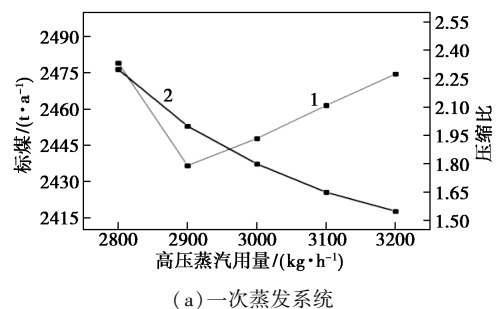
TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺中,由于压缩蒸汽直接作为 1 效蒸发器的热源,因此要同时满足压缩蒸汽与 1 效蒸发器的换热温差、热负荷 2 个条件。规定压缩蒸汽与 1 效蒸发器的换热温差均为 10℃,依据 2 个蒸发系统中 1 效蒸发器的温度分别为 110、117℃,确定一次蒸发系统中压缩机的出口压力为 0.22 MPa,二次蒸发系统中压缩机的出口压力为 0.25 MPa。至于热负荷的匹配,主要取决于压缩机的蒸汽压缩量,而压缩量又与 2 效二次蒸汽的量和动力蒸汽的量有关。动力蒸汽用量多,混合蒸汽的压力增加,压比减小则压缩机电耗就会降低;反之,若动力蒸汽用量少,则混合蒸汽的压力减

基础上,对 I 效和 II 效蒸发系统均采用 TVR 热泵双效蒸发工艺后,一次蒸发系统的能耗降低了 62.6%,二次蒸发系统的能耗降低了 60.3%,总能耗降低了 61.5%。可见,TVR 热泵双效蒸发工艺以消耗一定量的高压蒸汽为代价,使得 2 效二次蒸汽得到了充分的利用,较常规双效蒸发工艺具有明显的节能效果。

3.2 TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺

TVR 热泵技术需要消耗一定量的高温位动力蒸汽来提升二次蒸汽的温度和压力。而 MVR 热泵技术^[18-20]则是在消耗电能的基础上来提升二效蒸汽的温度和压力,但由于二次蒸汽的压力较低,若 2 效二次蒸汽直接压缩,势必要求很高的压缩比,会导致电耗的大幅增加,经济性不高。鉴于 TVR 热泵技术只耗蒸汽不耗电,而 MVR 热泵技术只耗电不耗蒸汽这种特点,把 2 种热泵技术有机地耦合在一起,即先应用 TVR 热泵技术把 2 效二次蒸汽提升至一定的压力后,再用 MVR 热泵技术提升至规定的压力,由此可以大幅度达到节能的目的。TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺如图 4 所示。

小,压比增大则压缩机电耗就会增加。因此,动力蒸汽的用量是个关键参数,不仅影响压比,而且还影响能耗,图 5 为动力蒸汽用量与能耗及压比的关系曲线。



(a) 一次蒸发系统

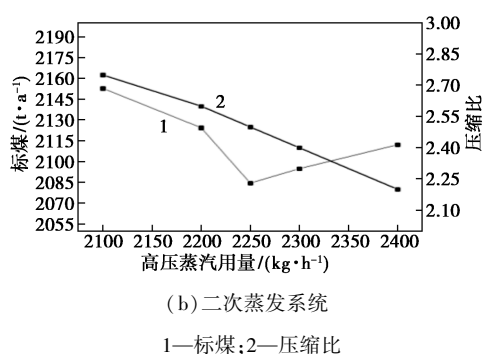


图 5 动力蒸汽用量与能耗及压比的关系曲线

由图 5 可知,随着动力蒸汽用量的增加,压比减小,而能耗则呈现先减小后增大的趋势。当一次蒸发系统和二次蒸发系统中动力蒸汽的用量分别为 2 900/2 250 kg/h 时,2 个蒸发系统能耗均最小,TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺模拟结果汇总表 3。

表 3 TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺模拟结果

项目	I 效蒸发系统		II 效蒸发系统	
	1 效蒸发器	2 效蒸发器	1 效蒸发器	2 效蒸发器
操作压力/MPa	0.10	-0.065	0.10	-0.07
压缩比	2.2		2.8	
压缩机电耗/kW	497.5		577.8	
二次蒸汽温度/℃	100	73	100	69
压缩蒸汽温度/℃	—	120	—	127
二次蒸汽量/(kg·h ⁻¹)	7034	6519	8120	6236
高压蒸汽用量/(kg·h ⁻¹)	2900		2250	
引射系数 ξ	0.44		0.36	
蒸发负荷/kW	6246.8	3454.4	5690.7	4014.1
能耗/kW	2253.2		1748.2	
总能耗/kW	4001.4			
总能耗(标煤)/(t·a ⁻¹)	4520.3			

由表 1 和表 3 数据可知,TVR 耦合 MVR 热泵的双效蒸发工艺相较于常规双效蒸发工艺可以大幅节能,总能耗降低了 71.4%。而由表 2 和表 3 数据可知,在 TVR 热泵双效蒸发工艺的基础上,对 I 效和 II 效蒸发系统均采用 TVR 耦合 MVR 热泵技术后,2 个蒸发系统的引射均减小,即引射所需的高压蒸汽量均减少,一效蒸发系统的能耗降低了 18.1%,二次蒸发系统的能耗降低了 33.8%,总能耗降低了 25.8%。可见,TVR 耦合 MVR 热泵的双效

蒸发工艺要比 TVR 热泵双效蒸发工艺具有更好的节能优势。

4 综合经济效益评价

以上研究只是对各种蒸发工艺的能耗进行了比较,由于节能工艺中增加了设备投资,因此设备投资费用会有所增加。为进一步佐证各节能蒸发工艺的经济优势,以年总费用(ATC)作为各蒸发工艺的综合经济效益评价指标。由于不同地区资源差异大,导致公用工程单价差异也大。例如西北地区煤炭资源丰富,但是淡水资源少则电费单价相对较低,蒸汽单价相对较高;而长江流域例如三角洲地区淡水资源丰富,但是电力主要靠西气东输工程则蒸汽单价相对较低,电费单价相对较高。因此,不同区域选用何种节能蒸发工艺主要取决于 ATC 的大小。

为了便于比较,以下统一将常规双效蒸发工艺标为工艺 1,TVR 热泵双效蒸发工艺标为工艺 2,TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺标为工艺 3。将电力资源丰富的区域记为区域 A,水资源丰富的区域记为区域 B。区域 A 的公用工程价格为:低压蒸汽单价为 420 元/t,高压蒸汽单价为 480 元/t;冷却水单价为 0.35 元/t,冷冻盐水单价为 0.56 元/t;电费单价为 0.60 元/kWh。区域 B 的公用工程价格为:低压蒸汽单价为 220 元/t,高压蒸汽单价为 270 元/t;冷却水单价为 0.35 元/t,冷冻盐水单价为 0.56 元/t;电费单价为 0.80 元/kWh。且本文中设备折旧费用主要以压缩机以及换热器设备进行研究计算。计算结果如表 4 所示。

表 4 各种蒸发工艺 ATC 比较 万元/a

项目	区域 A			区域 B		
	工艺 1	工艺 2	工艺 3	工艺 1	工艺 2	工艺 3
加热介质费用	7096.5	2398.5	1797.1	5245.6	1349.1	1010.8
冷却介质费用	409.6	101.5	59.2	409.6	101.5	59.2
压缩机电费	—	—	464.5	—	—	619.3
设备折旧费	12.7	16.1	21.7	12.7	16.1	21.7
ATC	7518.8	2516.1	2342.5	5667.9	1466.7	1711.0

由表 4 可知,对于区域 A,由于电力资源丰富,因此工艺 3 是比较合适的,相比较于工艺 1 和工艺 2,ATC 分别节省 68.8%和 6.9%。而对于区域 B,由于水资源比较充足,工艺 2 则是比较合适的,相比较于工艺 1 和工艺 3,ATC 分别节省 74.1%和 16.9%。

总而言之,不管是区域 A 还是区域 B,TVR 热泵双效蒸发工艺与 TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺均比目前常规的双效蒸发工艺具有明显的节能效果和综合经济效益。

5 结论

本研究把 TVR 及 MVR 热泵技术应用于苦卤水的蒸发浓缩装置,采用 Aspen Plus 软件中的 ELEC-NRTL 热力学计算模型,通过对各种工艺的模拟与优化,得到以下结论。

(1)常规双效蒸发工艺中,仍有大量的低温位二次蒸汽无法得到全部利用,导致整个蒸发装置能耗高达 14 007 kW 左右。

(2)TVR 热泵双效蒸发工艺,由于低温位的二次蒸汽得到了全部的利用,因此与常规双效蒸发工艺相比,平均能耗减少了 61.5%,平均 ATC 节省了 70.3%。

TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺,结合了 TVR 热泵技术与 MVR 热泵技术各自的节能特点,将低温位的二次蒸汽有效地转化为高温位的蒸汽加以利用,对比常规双效蒸发工艺,平均能耗减少了 25.8%,平均 ATC 节省了 69.3%。

对于电力资源丰富但缺乏水资源的区域,TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺要优于 TVR 热泵双效蒸发工艺;而对于水资源丰富但缺乏电力资源的区域,TVR 热泵双效蒸发工艺则要优于 TVR 耦合 MVR 热泵双效蒸发工艺。

参考文献

- [1] 李柄缘,刘光全,王莹,等.高盐废水的形成及其处理技术进展[J].化工进展,2014,(2):493-497,515.
- [2] 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.
- [3] 袁俊生,吴举,邓会宁,等.中国海盐苦卤综合利用技术的开发进展[J].盐业与化工,2006,35(4):33-37.
- [4] Al-Mutaz I S, Wazeer I. Development of a steady-state mathematical model for MEE-TVC desalination plants [J]. Desalination, 2014, 351:9-18.
- [5] Kamali R K, Abbassi A, Sadough Vanini S A. A simulation model and parametric study of MED—TVC process [J]. Desalination, 2009, 235:340-351.
- [6] 吴易飞,韩东,甄璞杰,等.基于机械蒸汽再压缩的蒸发结晶单元改进设计[J].能源化工,2015,36:16-19.
- [7] 高磊,张凯,董冰,等.螺杆水蒸汽压缩机的 MVR 系统在碱回收中的应用[J].化工进展,2014,33(11):3112-3117.
- [8] Boukhalfa N, Méniat A. Thermodynamic modeling of aqueous electrolytes type 2-1 [J]. Procedia Engineering, 2016, 148:1121-1129.
- [9] 杨德明,顾强,朱碧云,等.基于有机朗肯循环的混合二甲苯 MVR 热泵精馏工艺[J].化工学报,2017,68(12):4641-4648.
- [10] 刘天柱,张华,赵东风,等.多效蒸发技术浓缩石化企业含盐废水的操作方案优化分析[J].现代化工,2014,34(11):140-143.
- [11] 李帅旗,王汉治,黄冲,等.基于 MVR 技术的单级双效蒸发浓缩系统性能分析[J].新能源进展,2008,6(1):36-41.
- [12] Zhao D, Xue J, Li S, et al. Theoretical analyses of thermal and economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high-salinity wastewater [J]. Desalination. 2011, 273 (2/3): 292-298.
- [13] El Dessouky H, Alatiqi I, Bingulac S, et al. Steady-state analysis of the multiple effect evaporation desalination process [J]. Chem Eng Technol, 1998, 21(5):437-451.
- [14] 陈侠,陈丽芳,王运花.苦卤 700C 沸腾蒸发析盐规律研究[J].盐业与化工,2008,37(4):4-7.
- [15] Kouta A, Al-Sulaiman F, Atif M, et al. Entropy, exergy, and cost analyses of solar driven cogeneration systems using supercritical CO₂ Brayton cycles and MEE-TVC desalination system [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 115:253-264.
- [16] Hanafi A S, Mostafa G M, Waheed A, et al. 1-D Mathematical modeling and CFD investigation on supersonic steam ejector in MED-TVC [J]. Energy Procedia, 2015, 75:3239-3252.
- [17] Megovern R K, Prakash Narayan G, Lienhard J H. Analysis of reversible ejectors and definition of an ejector efficiency [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 54:153-166.
- [18] 杨德明,朱碧云,顾强,等.基于机械蒸汽再压缩和有机朗肯循环技术的双溶剂协同萃取精馏分离乙酸甲酯-甲醇-水节能工艺[J].化工进展,2018,37(5):2010-2015.
- [19] 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.
- [20] 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):84-86. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>