文章编号:0253-4339(2021) 03-0019-09
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.03.019

机械蒸气再压缩系统再生高浓度溶液的性能研究

张勤灵　刘晓华　张 涛

(清华大学建筑技术科学系　北京　100084)

摘　要　机械蒸气再压缩(MVR)系统是一种高效的蒸发系统,本文通过模拟与实验的方法对 MVR 系统再生高浓度 $CaCl_2$ 溶液的性能进行研究,分析了蒸发压力、入口溶液质量浓度等输入参数对 MVR 系统再生性能的影响。研究结果表明:蒸发压力通过吸气密度影响再生速率,蒸发压力越大,再生速率越大,系统能耗越大;入口 $CaCl_2$ 溶液质量浓度为 0.3,当蒸发压力从 20 kPa 增至 80 kPa,MVR 再生系统的 SEC 值从 46.67 kWh/m^3 增至 79.51 kWh/m^3,系统 COP 从 14.4 降至 8.2。入口溶液质量浓度通过溶液沸点温升影响 MVR 系统再生性能,溶液质量浓度越高,沸点温升越大,压缩机功耗越大;蒸发压力为 20 kPa,当入口 $CaCl_2$ 溶液质量浓度从 0.25 增至 0.39 时,系统 SEC 值从 36.68 kWh/m^3 增至 75.76 kWh/m^3,系统 COP 从 18.1 降至 9.1。从溶液质量浓度、溶液等效含湿量以及蒸发压力 3 个维度分析,$CaCl_2$ 溶液相比 LiCl 溶液和 LiBr 溶液在 MVR 系统中的再生性能最优。

关键词　机械蒸气再压缩系统;溶液再生;$CaCl_2$ 溶液;数学模型
中图分类号:TK11;TK14　　**文献标识码**: A

Regeneration Performance of High Concentration Solution by Mechanical Vapor Recompression System

Zhang Qinling　Liu Xiaohua　Zhang Tao

(Department of Architectural Technology Science, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract　A mechanical vapor recompression (MVR) system is an efficient evaporation system. In this study, the performance of an MVR system in generating high concentration $CaCl_2$ solutions was studied through simulation analysis and experiments. The influence of input parameters, including evaporation pressure and inlet dilute solution concentration, on the regeneration performance of the MVR system was studied. The regeneration rate is affected by evaporation pressure on which the suction density is depended. The higher the evaporation pressure, the higher the regeneration rate and energy consumption of the system. Under the condition that the concentration of the $CaCl_2$ solution at the inlet was 0.3, the SEC value of MVR regeneration system increased from 46.67 to 79.51 kWh/m^3, and the COP of the system decreased from 14.4 to 8.2 when the evaporation pressure increased from 20 to 80 kPa. The concentration of the inlet solution affects the regeneration performance of the MVR system by increasing the boiling point of the solution. The higher the concentration of the solution, the higher the boiling point, and the higher the power consumption of the compressor. Under the condition that the evaporation pressure was 20 kPa, the SEC value of the system increased from 36.68 to 75.76 kWh/m^3, and the COP of the system decreased from 18.1 to 9.1 when the concentration of inlet $CaCl_2$ solution increased from 0.25 to 0.39. In terms of solution concentration, equivalent moisture content, and evaporation pressure, the $CaCl_2$ solution had the best regeneration performance in the MVR system compared with the LiCl and LiBr solutions.

Keywords　mechanical vapor recompression system;solution regeneration;calcium chloride solution;mathematical model

溶液除湿空调可以实现高效的空气除湿,其常用高浓度的盐溶液作为液体干燥剂,如 LiBr、LiCl、$CaCl_2$ 等[1]。为保证除湿性能,需对高浓度的盐溶液进行浓缩再生,常用的再生方式有填料塔再生[2]、电渗析再生[3]、膜法再生[4]等。

机械蒸气再压缩(MVR)系统是一种高效的再生系统,可以利用水蒸气的汽化潜热实现溶液的浓缩或水分的蒸发,广泛应用于海水淡化[5-6]、工业废水处理[7]、食品工业[8-9]、化学工业[10]等领域。H. S. Aybar[11]研究了蒸发压力和冷凝压力对以水为工作介质的压缩机能耗的影响。S. H. Mounir 等[12]利用水作为工作介质来研究 MVR 系统的性能,分析了不同压

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0705202)资助项目。(The project was supported by National Key R & D Program of China (No. 2018YFC0705202).)

收稿日期:2020-08-23;修回日期:2020-11-05

缩比下的工作性能。H. Ettouney 等[13-14]设计了以海水为工作介质的 MVR 系统,研究了传热温差和传热面积对系统的影响。Yang Junling 等[15]通过实验比较了带注水压缩机和不带注水压缩机的 MVR 系统的性能,结论为在相同的能耗下,带注水压缩机的蒸发速率比不注水压缩机大。梁林[16]提出了一种两级的 MVR 系统来处理工业硫酸铵废水,通过实验测量出口溶液的温度和压缩机的能耗来验证该模型可行性。Ai Songhui 等[17]建立了 MVR 系统浓缩浓 NaCl 溶液的数值模型,并研究了溶液进口参数对于 MVR 再生性能的影响。张承虎等[18]通过数值模型研究了低浓度 $MgCl_2$ 溶液的沸点温升对于 MVR 系统浓缩性能的影响。

但在目前的研究中,缺少 MVR 系统对高浓度溶液浓缩的性能研究。由于高浓度溶液的沸点温升远高于工业废水或海水,这对 MVR 系统中压缩机的能耗产生较大影响。因此,研究 MVR 系统再生高浓度盐溶液对于扩展 MVR 再生技术在溶液除湿领域的应用具有重要意义。本文选择 $CaCl_2$ 溶液作为 MVR 再生系统的工作介质,建立了 MVR 系统再生的稳态模型,并且通过实验验证该模型。通过变工况模拟,分析了溶液质量浓度、蒸发压力、蒸发器换热能力以及压缩机吸气流量对 MVR 系统再生性能的影响,最后对比研究了 MVR 系统对于 3 种常用除湿溶液 LiBr、LiCl 和 $CaCl_2$ 溶液的再生性能。

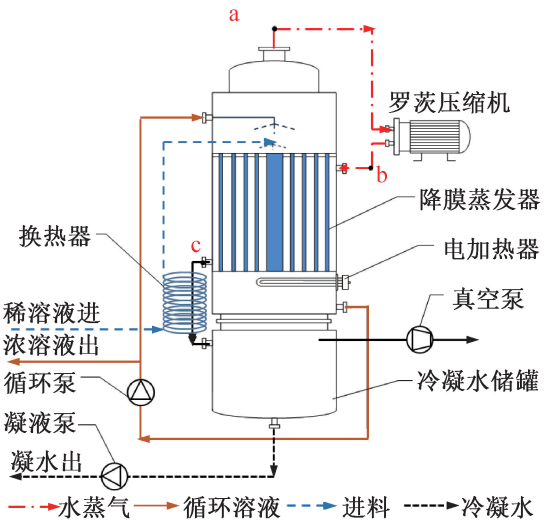
1 MVR 溶液再生模型

MVR 再生系统如图 1(a)所示。该系统主要由蒸发器(管壳式换热器)、压缩机、溶液循环泵、真空泵、阀门和部分连接管组成。稀溶液由喷嘴均匀喷入蒸发器,在管内侧吸热蒸发产生过热水蒸气 a;水蒸气 a 进入压缩机被压缩成高温高压的过热蒸气 b;过热蒸气 b 进入蒸发器的壳侧作为热源加热溶液,从而使得蒸发过程可以源源不断的进行,同时 b 被冷凝成液态水 c;水蒸气的热力过程如图 1(b)所示。在 MVR 再生溶液系统中,稀溶液再生成浓溶液,并且蒸发出的高温蒸气变成冷凝水。

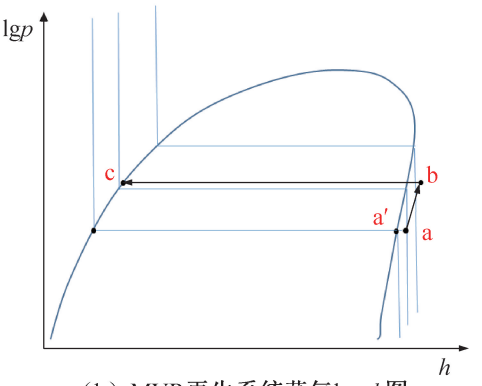
1.1 数学模型

再生模型主要由压缩机模型和蒸发器模型组成,系统的工作介质是高浓度的 $CaCl_2$ 溶液。模型的简化假设:1)热交换器、泵和其他连接管的热损失可以忽略;2)系统中没有不可冷凝的气体;3)系统处于热力学平衡状态;4)沿管道的压降可忽略不计;5)来自蒸发器出口的冷凝水饱和。

1)压缩机模型



(a) MVR再生系统



(b) MVR再生系统蒸气lg*p*-*h*图

图 1 MVR 再生系统工作原理

Fig.1 The working principle of MVR regeneration system

MVR 再生溶液系统压缩机为罗茨压缩机,是一种开式压缩机,电机通过轴驱动压缩机做功。压缩工作介质为水蒸气,水蒸气被吸入压缩机后,经过加温加压变成高温高压的水蒸气。压缩机做功转换为水蒸气进出口焓差,所以压缩机内的能量守恒关系用式(1)计算。

$$W_{com} = m_{vap}(h_b - h_a) \tag{1}$$

式中:W_{com}为压缩机所做有用功,kW;m_{vap}为压缩机的蒸发速率,kg/s;h_b 为压缩后水蒸气焓值,kJ/kg;h_a 为压缩前水蒸气焓值,kJ/kg。

压缩机的吸气速率,即溶液中水蒸气的蒸发速率,主要由压缩机的吸气密度与吸气的体积流量决定。压缩机的吸气密度主要受压缩工作介质的种类及吸气压力影响,而吸气的体积流量受压缩机类型和压缩机转速影响,对于罗茨压缩机(一种容积式压缩机),吸气的体积流量主要受压缩机转速影响。本模型中压缩机转速不变,所以压缩机的吸气速率可以由式(2)计算。

$$m_{vap} = \rho_a V_a \tag{2}$$

式中：ρ_a 为压缩机进口蒸气密度，kg/m^3；V_a 为压缩机吸气的体积流量，m^3/s。

压缩过程可近似看作等熵压缩过程。压缩机的电机功率可由式(3)计算。

$$W_{com} = W_e(\eta_e \eta_m \eta_c) \tag{3}$$

式中：W_e 为压缩机消耗的电功，kW；η_e 为压缩机电机效率，取 0.8；η_m 为轴传动的机械效率，取 0.8；η_c 为压缩过程的压缩效率，取 0.7。

2)蒸发器模型

蒸发器是 MVR 再生溶液系统的关键部件，蒸发器两侧分别为再生溶液和高温高压的水蒸气。蒸发器利用了水蒸气的汽化潜热加热再生溶液，使溶液蒸发出水蒸气，溶液因此变浓，水蒸气冷凝成为液态水。

根据能量守恒原理，溶液蒸发侧的换热量等于水蒸气冷凝侧的换热量，同时等于蒸发器管壁的传热量。如图 2 所示，在溶液蒸发侧，稀溶液被加热后再生为浓溶液和水蒸气两部分，由溶液的蒸发侧质量守恒可得式(4)和(5)。

$$m_{s,in} = m_{s,out} + m_{vap} \tag{4}$$

$$m_{s,in} x_{in} = m_{s,out} x_{out} \tag{5}$$

式中：$m_{s,in}$ 为进口溶液的流量，kg/s；$m_{s,out}$ 为出口溶液的流量，kg/s；x_{in} 为进口溶液的质量浓度；x_{out} 为出口溶液的质量浓度。

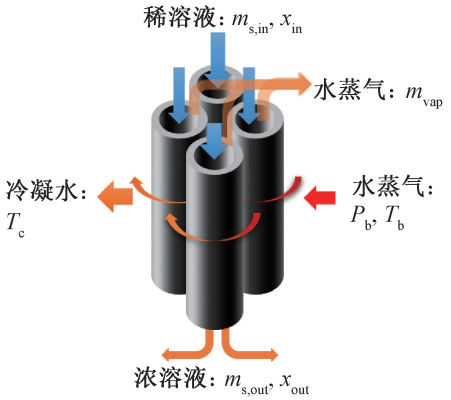


图 2 蒸发器模型

Fig.2 Evaporator model

溶液蒸发侧换热量可由式(6)计算。

$$m_{s,in} h_{s,in} + W_{com} = m_{s,out} h_{s,out} + m_{vap} h_c \tag{6}$$

式中：$h_{s,in}$ 为进口溶液的焓，kJ/kg；$h_{s,out}$ 为出口溶液的焓，kJ/kg；h_c 为冷凝水的焓，kJ/kg。

结合式(1)和式(6)可得：

$$m_{s,in} h_{s,in} + Q = m_{s,out} h_{s,out} + m_{vap} h_a \tag{7}$$

式中：Q 为蒸发器中溶液与水蒸气的换热量，kW。

在蒸气冷凝侧，高温高压的水蒸气被冷凝成液态水，冷凝换热量计算如式(8)。

$$Q = m_{vap}(h_b - h_c) \tag{8}$$

结合式(7)和(8)可得：

$$Q = m_{vap} h_a + (m_{s,in} - m_{vap}) h_{s,out} - h_{s,in} m_{s,in} \tag{9}$$

蒸发器的通过管壁的传热量计算如式(10)。

$$Q = KF\Delta T_2 \tag{10}$$

式中：K 为传热系数，kW/(m^2·℃)；F 为传热面积，m^2；ΔT_2 为管壁两侧换热对数平均温差，℃。

在 MVR 蒸发器的传热过程中，冷凝侧水蒸气冷凝释放的热量主要包含两部分：过热蒸气到饱和蒸气的显热换热、饱和蒸气到冷凝水的潜热换热。如图 3 所示，潜热换热量远大于显热换热量，因此在对数平均温差计算传热量时忽略显热换热阶段。对其中的 ΔT_2 进行修正，如式(11)所示。

$$\Delta T_2 = \frac{T_c - T_{s,in} - (T_c - T_{s,out})}{\ln \dfrac{T_c - T_{s,in}}{T_c - T_{s,out}}} \tag{11}$$

式中：T_c 为冷凝水温度，℃；$T_{s,in}$ 为进口溶液温度，℃；$T_{s,out}$ 为出口溶液温度，℃。

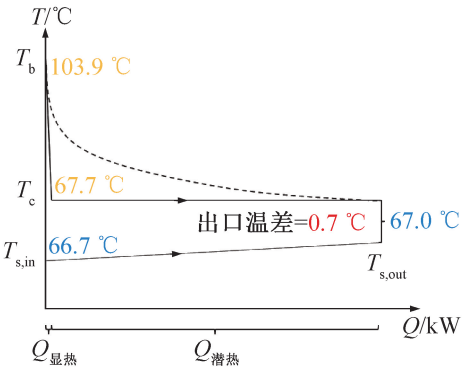


图 3 蒸发器换热过程 *T-Q* 图

Fig.3 The *T-Q* diagram of evaporator heat exchange process

3)溶液物性

在 MVR 再生溶液系统中，压缩机提供的蒸气温升需要克服溶液的沸点温升以及蒸发器两侧的换热温差。溶液的沸点相对于相同压力下水的沸点的差值叫做溶液的沸点温升，计算式为：

$$\Delta T_b = T_{b,s} - T_{b,w} \tag{12}$$

式中：ΔT_b 为溶液沸点温升，℃；$T_{b,s}$ 为溶液沸点，℃；$T_{b,w}$ 为同压力下水沸点，℃。

图 4 所示为不同压力下 $CaCl_2$ 溶液的沸点温升。$CaCl_2$ 溶液的沸点温升随溶液质量浓度的增加而增大，受蒸发压力的影响较小。

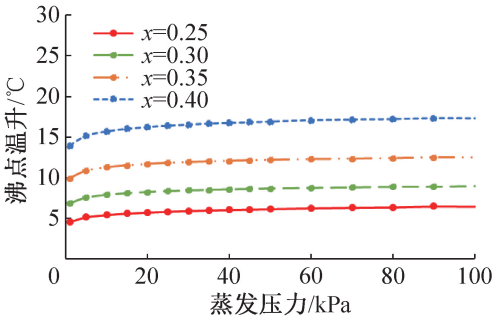


图 4 氯化钙溶液沸点温升

Fig.4 The boiling point rise of the calcium chloride solution

1.2 评价指标

本文主要从以下几方面评价 MVR 再生溶液系统的再生性能。

1)蒸发速率:单位时间溶液蒸发产生的蒸气量,决定了不同工况下 MVR 再生溶液系统的再生速率,计算式为:

$$m_{vap} = V_{vap}/v_{suc} \tag{13}$$

2)压缩机功耗:在 MVR 再生溶液系统中,忽略各循环泵的功耗以及系统运行初始阶段的电辅热,最主要的能耗为压缩机功耗 W_e。

3)单位能耗 SEC:指从溶液中分离出单位质量水的能耗,SEC 值计算式为:

$$SEC = W_e/m_{vap} \tag{14}$$

4)系统 COP:定义为蒸发器换热量与压缩机能耗的比值,如式(15):

$$COP = \frac{Q}{W_e} = \frac{m_{vap}(h_{dis} - h_{cw})}{W_e} \tag{15}$$

2 模型的实验验证

MVR 再生实验装置如图 5 所示,该装置主要由热交换器、压缩机、真空泵、溶液泵、水泵、电加热器、阀门、管道、电控柜和测试仪器组成。表 1 为装置主要组件的型号和类型,表 2 为测试仪器的测量范围和精度。本实验中,用温度传感器测量蒸气、溶液和冷凝水的温度;用压力传感器测量压缩机的吸气压力、排出压力、冷凝液压力和蒸发罐的压力;用流量测量喷雾溶液的体积流量以及压缩机的吸气体积流量;用密度计测量进口溶液的密度,并且根据溶液的密度和温度来计算进口溶液的质量浓度。

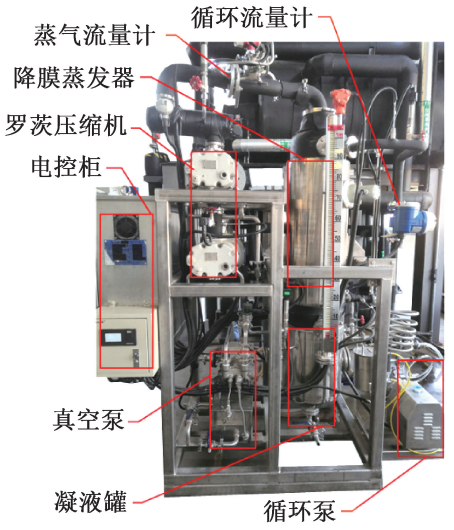


图 5 MVR 再生装置实物

Fig.5 The picture of MVR regeneration system

表 1 实验装置主要参数

Tab.1 The main parameters of experimental device

实验装置	型号	主要参数
压缩机	RVC-1	电机功率 1.1~5.5 kW;流量 5~200 m^3/h;转速 150~3 000 r/min。
蒸发器	管壳式换热器	单管内径 16 mm;换热面积 3.3 m^2。
真空泵	2BV2060	最大吸气速率 27 m^3/h;电机功率 1.1 kW。
循环泵	YUY-F-0.75	流量 3 m^3/h;扬程 16 m;功率 0.75 kW。

表 2 测量仪器

Tab.2 The measuring instruments

传感器	型号	测量范围	精度
温度传感器	WZPK-296	−200~450 ℃	±0.15 ℃
压力传感器	SP-852	0~200 kPa	±0.5 %
涡街流量计	LUGB-54-05D	0~400 m^3/h	±1.5 %

图 6 所示为不同蒸发压力下,蒸气入口温度、蒸气出口温度、压缩后压力的实验值和模拟值的比较。溶液入口质量浓度为 0.3,溶液质量流量 0.39 kg/s。由图中可知模拟值与实验值吻合较好。

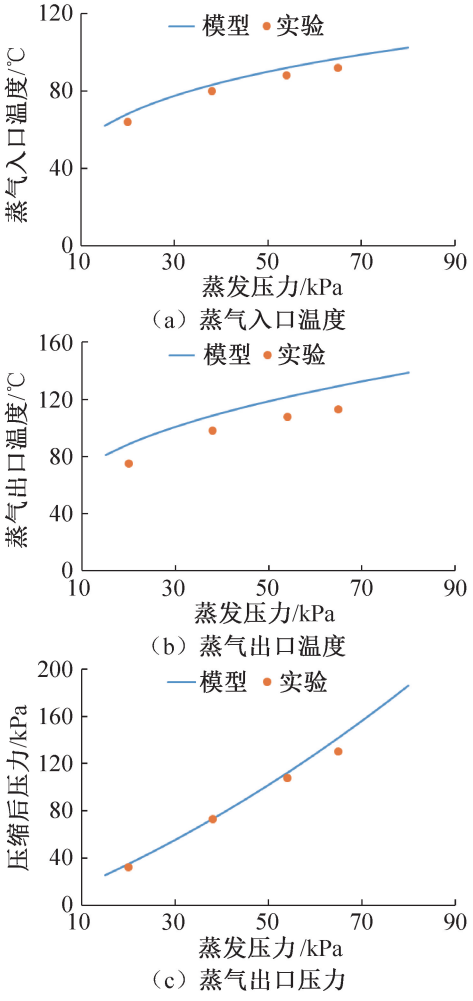


图 6 MVR 再生系统数学模型的实验验证

Fig.6 Experimental verification of mathematical model for MVR regeneration system

3 结果分析与讨论

1)入口溶液质量浓度

图 7 所示为入口溶液质量浓度对再生性能的影响,蒸发压力为 20 kPa,溶液质量流量为 0.39 kg/s,入口溶液质量浓度从 0.25 到 0.39 均匀变化。随着入口溶液质量浓度的升高,蒸气压缩前后温度和溶液沸点温升也升高,而蒸发器两侧的换热温差基本不变。由于蒸发压力不变,压缩机吸气密度基本不变,因此系统的蒸发速率保持稳定,而蒸气出口压力随着溶液质量浓度的增加而增大。随着溶液质量浓度的增加,沸点升高显著,压缩机的功耗增加明显。SEC 值随着入口溶液质量浓度的升高而增加,表明蒸发每单位质量水的功耗增加。当入口溶液质量浓度分别为 0.25、0.39 时,SEC 值分别为 36.68 kWh/m^3、75.76 kWh/m^3,COP 分别为 18.1、9.1。表明入口溶液质量浓度的升高会显著增加系统能耗,减小再生系统的 COP。

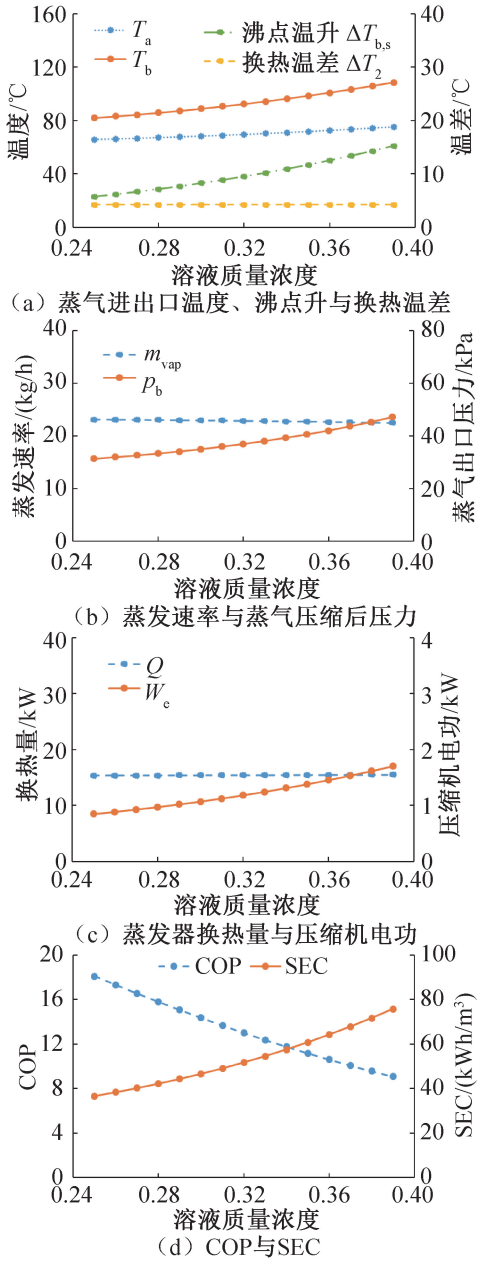


图 7 变溶液质量浓度工况分析

Fig.7 Condition analysis of changing solution concentration

2)蒸发压力

图 8 所示为蒸发压力对再生性能的影响,溶液质量浓度为 0.3,溶液的质量流量为 0.39 kg/s,蒸发压力从 20 kPa 到 80 kPa 均匀变化。随着蒸发压力的升高,蒸气压缩前后温度、蒸发器两侧换热温差不断升高,由于溶液沸点温升主要取决于溶液质量浓度,所以沸点温升基本不变。蒸发压力增加,导致压缩机吸

气密度增加,因此系统的蒸发速率显著增大,出口溶液质量浓度增大。随着蒸发速率的增加,蒸发器两侧的换热量与压缩机的功耗显著增加。SEC 值随着蒸发压力的升高而增加,表明蒸发每单位质量水的功耗增加。当蒸发压力为 20 kPa 时,SEC 值达到 46.67 kWh/m^3;当蒸发压力增至 80 kPa 时,SEC 达到 79.51 kWh/m^3;而 COP 从 14.2 降至 8.2。所以蒸发压力升高会显著增加系统能耗,同时减小再生系统的 COP。

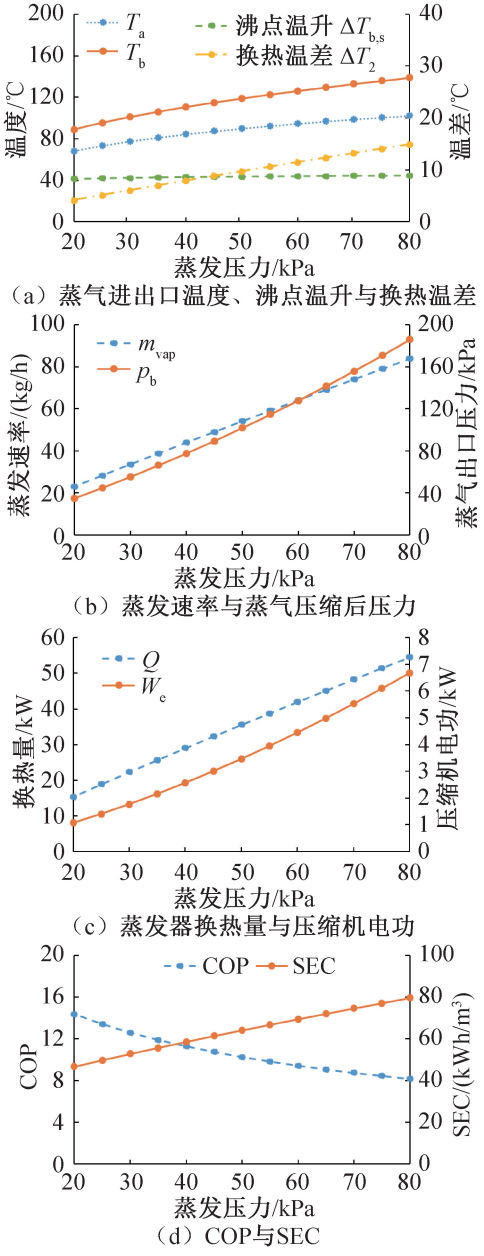


图 8 变蒸发压力工况分析

Fig.8 Conditions analysis of changing evaporation pressure

3)蒸发器换热能力

初始参数 KF 由蒸发器的换热能力决定,研究蒸发器换热能力 KF 对于 MVR 再生性能的影响。将蒸发压力设置为 20 kPa,压缩机吸气流量 V_{vap} 为 0.05 m^3/s,溶液的质量流量为 0.39 kg/s,入口稀溶液质量浓度为 0.3,KF 从 1 kW/℃到 5 kW/℃均匀变化,KF 的模拟结果如图 9 所示,改变 KF 并不影响换热量 Q,因为溶液和蒸气的入口参数并不改变;由式(10)可知换热温差随 KF 的增大而反比减小;溶液的进出口温度不变,由式(11)可知蒸气的冷凝温度随换热温差的减小而减小,因此蒸气的冷凝压力即蒸气出口压力随之减小。蒸气的出口压力减小表明压缩机的功耗减小,当 KF 由 1 增至 5 时,系统 COP 由 7.46 增至 15.81,SEC 由 89.8 kWh/m^3 减至 42.4 kWh/m^3。因此蒸发器换热能力的提高会显著降低系统能耗,增加再生系统的 COP。

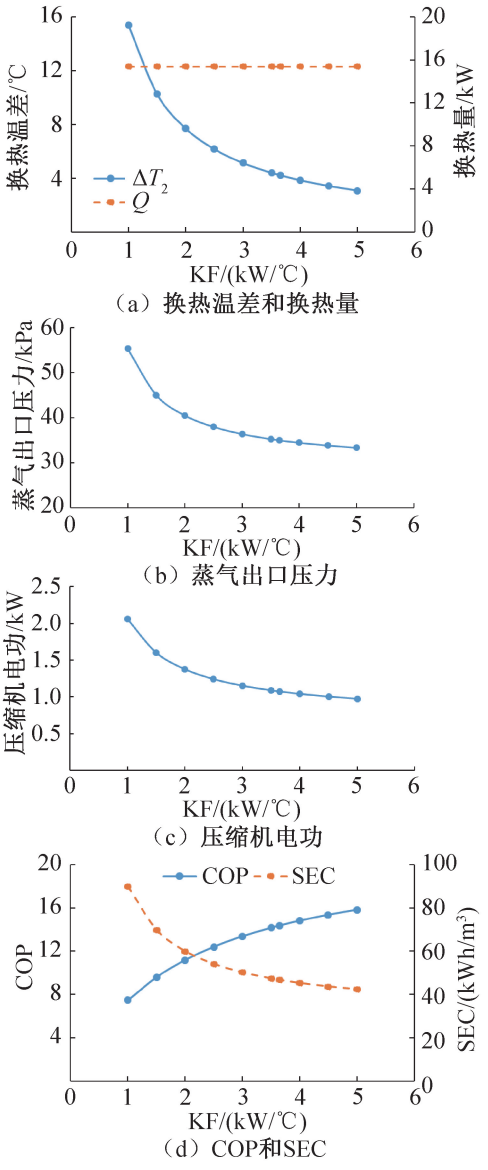


图 9 蒸发器不同换热能力 KF 结果分析

Fig.9 Result analysis of changing the evaporator heat exchange capacity KF

4)压缩机吸气流量

压缩机的吸气流量 V_{vap} 由压缩机的种类、大小以及压缩频率决定,在基础工况:蒸发压力 20 kPa,溶液质量流量 0.39 kg/s,入口稀溶液质量浓度 0.3,吸气流量 V_{vap} 从 0.01 m^3/s 到 0.1 m^3/s 均匀变化时,吸气流量 V_{vap} 的变化对 MVR 再生性能的影响如图 10 所示。吸气流量 V_{vap} 变化直接影响系统的蒸发速率,系统的蒸发速率和溶液出口质量浓度都随吸气流量的增加而增大;蒸发速率 m_{vap} 增加表明换热量 Q 增加,KF 不变,则蒸发器两侧的换热温差增加;换热温差增大,而溶液进出口温度几乎不变,则蒸气的冷凝温度增大,所以蒸气的出口压力增大,同时压缩机的功耗 W_e 增加;最后 MVR 系统 COP 随 V_{vap} 的增大而减小,表明吸气流量 V_{vap} 对压缩机功耗 W_e 的影响比对换热量 Q 的影响大,当 V_{vap} 由0.01 m^3/s增至 0.1 m^3/s 时,系统 COP 可以由 18.49 减至 10.55;MVR 系统的 SEC 随 V_{vap} 的增加而增大,当 V_{vap} 由 0.01 m^3/s 增至 0.1 m^3/s 时,系统 SEC 由 37.1 kWh/m^3 增至 65.1 kWh/m^3。

5)溶液类型

溶液除湿常用的盐溶液除了 $CaCl_2$ 溶液,还有 LiBr 和 LiCl 溶液。为了研究不同除湿溶液在 MVR 系统中的再生性能,本文保持相同的初始参数(KF、V_{vap}、m_{sin}不变),通过模型计算比较了 3 种除湿溶液在不同质量浓度和不同蒸发压力下的再生性能。

将蒸发压力设置为 20 kPa,溶液的质量流量为 0.39 kg/s,入口稀溶液质量浓度从 0.25 到 0.39 均匀变化,3 种溶液的再生性能如图 11(a)所示。3 种溶液再生的 COP 都随溶液质量浓度的增加而减小,其中 $CaCl_2$ 溶液的再生 COP 最高, LiCl 溶液最低;3 种溶液的再生单位能耗 SEC 中,$CaCl_2$ 溶液的 SEC 值最小,再生性能最好, LiCl 溶液的 SEC 值最高。

在溶液除湿机空调系统中,决定溶液除湿性能的关键因素是溶液的等效含湿量,计算 3 种溶液在 20 ℃时的等效含湿量,可以比较 3 种溶液在不同等效含湿量下的再生性能,如图 11(b)所示。在 MVR 系统中 3 种溶液的再生 COP 随溶液等效含湿量的增加而增大,并且 $CaCl_2$ 溶液和 LiCl 溶液的再生性能接近,而 LiBr 溶液的再生性能较差;在溶液等效含湿量为 8 g/(kg 干空气)时, $CaCl_2$ 溶液和 LiCl 溶液的再生 COP 分别为 11.77 和 10.92,而 LiBr 为 6.97,$CaCl_2$ 溶液和 LiCl 溶液的再生 COP 分别比 LiBr 溶液的高 68.8%和 56.7%。从系统单位能耗指标 SEC 值来看,同样是 $CaCl_2$ 溶液的 SEC 值最小,再生性能最好,LiBr 溶液的 SEC 值最高。

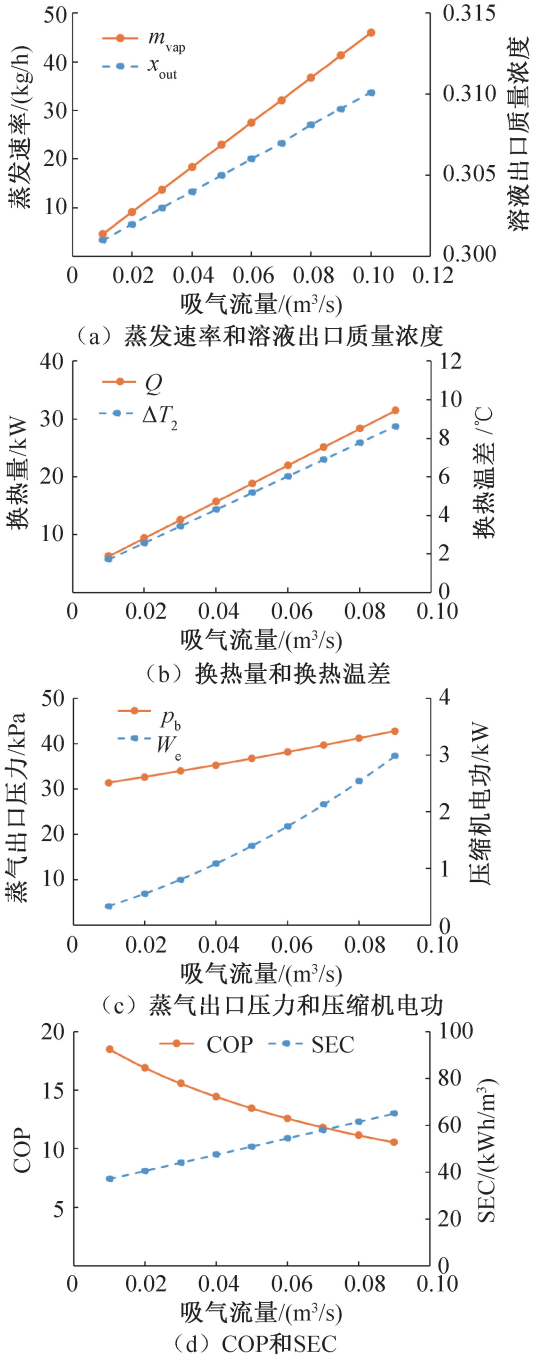
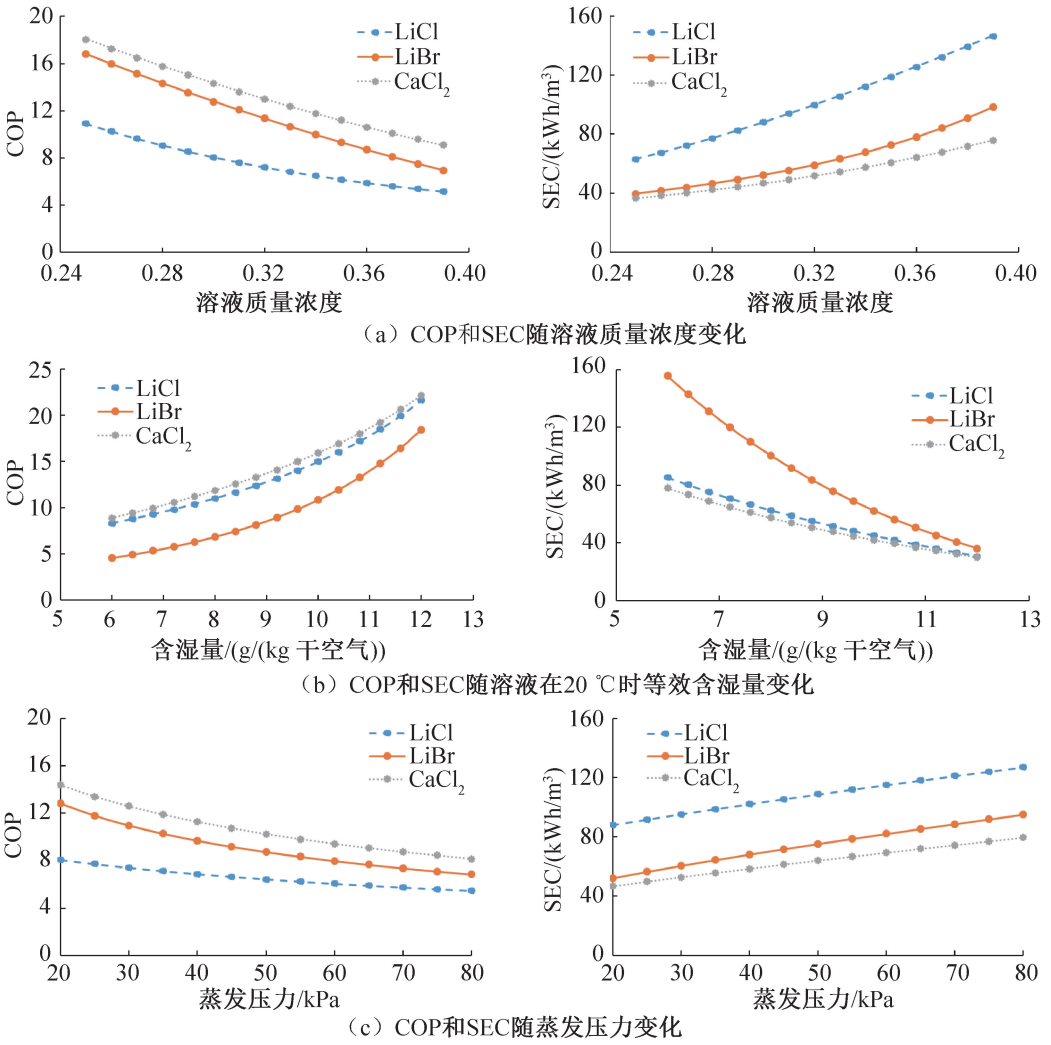


图 10 不同吸气流量结果分析

Fig.10 Result analysis of changing suction flow

为研究蒸发压力对 3 种溶液再生性能的影响,蒸发压力从 20 kPa 到 80 kPa 均匀变化,3 种溶液在不同蒸发压力下再生性能如图 11(c)所示。$CaCl_2$ 溶液再生的 COP 最高, LiCl 溶液的 COP 最低;从系统单位能耗指标来看,同样表现为 $CaCl_2$ 溶液的再生性能最好。综上,从 3 个维度:溶液质量浓度、溶液等效含湿量以及蒸发压力来看,3 种常规除湿溶液中的 $CaCl_2$ 溶液在 MVR 系统中的再生性能最好,再生 COP 最高,同时再生的单位能耗也最低。



（a）COP和SEC随溶液质量浓度变化

（b）COP和SEC随溶液在20 ℃时等效含湿量变化

（c）COP和SEC随蒸发压力变化

图 11 不同溶液再生性能对比

Fig.11 Comparison of regeneration performance for different solutions

4 结论

本文建立了 MVR 系统再生高浓度除湿溶液的稳态模型，并通过实验验证了模型的可靠性，结论如下：

1）入口溶液质量浓度通过溶液沸点温升影响 MVR 系统再生性能，溶液质量浓度越高，沸点温升越大，压缩机功耗越大；蒸发压力为 20 kPa，当入口溶液质量浓度从 0.25 升至 0.39 时，系统 SEC 值从 36.68 kWh/m^3 增至 75.76 kWh/m^3，系统 COP 从 18.1 降至 9.1。

2）蒸发压力通过吸气密度来影响再生速率，蒸发压力越大，再生速率越大，系统能耗越大；入口溶液质量浓度为 0.3，蒸发压力从 20 kPa 增至 80 kPa，MVR 再生系统的 SEC 值从 46.67 kWh/m^3 增至 79.51 kWh/m^3，系统 COP 从 14.4 降低到 8.2。

3）变初始参数工况，增加蒸发器换热能力 KF 以及适当减小压缩机吸气流量 V_{vap} 可以提高 MVR 系统再生溶液的再生性能。

4）从溶液质量浓度、溶液等效含湿量以及蒸发压力 3 个维度来看，$CaCl_2$ 溶液相比 LiCl 溶液和 LiBr 溶液，在 MVR 系统中的再生性能最好，再生 COP 最高，同时再生的单位能耗 SEC 值也最低。

参考文献

[1] LIU Xiaohua, JIANG Yi, XIA Jianjun, et al. Analytical solutions of coupled heat and mass transfer processes in liquid desiccant air dehumidifier/regenerator[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 48(7): 2221-2232.

[2] 钱俊飞, 殷勇高, 张小松. 叉流除湿器热质传递性能实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 46-52. (QIAN Junfei, YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong. Experimental study on heat and mass transfer performance of cross-flow dehumidifier [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 46-52.)

[3] 周君明, 张小松, 孙博. 太阳能溶液除湿空调系统再生技术的研究进展与能耗分析[J]. 制冷学报, 2019, 40(2):154-160, 166. (ZHOU Junming, ZHANG Xiaosong, SHUN Bo. Research progress and energy consumption analysis on regeneration technology of solar solution dehumidification air conditioning system[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(2):154-160, 166.)

[4] ZHANG Lizhi. An analytical solution for heat mass transfer in a hollow fiber membrane based air-to-air heat mass exchanger[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 360(1):217-225.

[5] 越云凯, 吴小华, 张振涛. MVR 海水淡化系统运行特性分析与优化[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(9):1985-1990. (YUE Yunkai, WU Xiaohua, ZHANG Zhentao. MVR seawater desalination system operation characteristics analysis and optimization [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(9): 1985-1990.)

[6] 赵媛媛, 赵磊, 钱方, 等. 机械蒸气再压缩(MVR)蒸发器在食品工业中的应用[J]. 中国乳品工业, 2015, 43(1):27-28, 50. (ZHAO Yuanyuan, ZHAO Lei, QIAN Fang, et al. Application of mechanical vapor recompression (MVR) evaporator in food industry [J]. China Dairy Industry, 2015, 43 (1): 27-28, 50.)

[7] 梁林, 韩东, 彭涛. 机械蒸气再压缩硫酸铵废水处理系统的分析[J]. 化学工程, 2012, 40(8):74-78. (LIANG Lin, HAN Dong, PENG Tao. Exercise analysis of ammonium sulfate wastewater treatment system by mechanical steam recompression [J]. Chemical Engineering (China), 2012, 40 (8):74-78.)

[8] MUJUMDAR A S, 吴中华. 工业干燥的革新现状与研发需求[J]. 干燥技术与设备, 2007(2):60-69. (MUJUMDAR A S, WU Zhonghua. Innovation status and R&D requirements of industrial drying [J]. Drying Technology & Equipment, 2007 (2):60-69.)

[9] 闫成林, 胡洪铭. 机械蒸气再压缩(MVR)技术在全卤制碱工艺中的应用[J]. 中国氯碱, 2011(10):9-11. (YAN Chenglin, HU Hongming. Application of mechanical vapor recompression (MVR) technology in total halogen alkali production process [J]. China Chlor-Alkali, 2011 (10):9-11.)

[10] 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. (JIANG Hua, ZHANG Ziyao, GONG Wuqi. Design and research of MVR parallel double-effect evaporative crystallization system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(10): 4461-4469.)

[11] AYBAR H S. Analysis of a mechanical vapor compression desalination system[J]. Desalination, 2002, 142(2):181-186.

[12] MOUNIR S H, FEIDT M, VASSE C. Thermoeconomic study of a system for pollutant concentration with mechanical vapour compression [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 25(2):473-484.

[13] ETTOUNEY H, ElDESSOUKY H, AlROUMI Y. Analysis of mechanical vapour compression desalination process[J]. International Journal of Energy Research, 1999, 23(5): 431-451.

[14] ETTOUNEY H. Design of single-effect mechanical vapor compression[J]. Desalination, 2005, 190(1/3):1-15.

[15] YANG Junling, ZHANG Chong, ZHANG Zhentao. Study on mechanical vapor recompression system with wet compression single screw compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103:205-211.

[16] 梁林. 处理高浓度含盐废水的机械蒸气再压缩系统设计及性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013. (LIANG Lin. Design and performance study of mechanical steam re-compression system for treating high concentration saline wastewater [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.)

[17] AI Songhui, WANG Baolong, LI Xianting, et al. Numerical analysis on the performance of mechanical vapor recompression system for strong sodium chloride solution enrichment [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137:386-394.

[18] 张承虎, 孙文, 林已又. 沸点温升影响下机械蒸气再压缩系统性能研究[J]. 化学工程, 2018, 46(10):21-25. (ZHANG Chenghu, SUN Wen, LIN Jiyou. Research on the performance of mechanical steam recompression system affected by boiling point temperature rise [J]. Chemical Engineering(China), 2018, 46(10):21-25.)

通信作者简介

张勤灵, 男, 博士研究生, 清华大学建筑技术科学系, 15313707315, E-mail:zhangql18@mails.tsinghua.edu.cn。研究方向:低湿环境营造方法及热学特性,除湿溶液再生方法的热学优化。

About the corresponding author

Zhang Qinling, male, Ph. D. candidate, Department of Architectural Technology Science, Tsinghua University, +86 15313707315, E-mail:zhangql18@mails.tsinghua.edu.cn. Research fields: creating low humidity environment and thermal characteristics, thermal optimization and research on regeneration method of dehumidifying solution.