

# 两效机械蒸汽再压缩蒸发系统性能分析

刘燕<sup>1</sup>, 裴程林<sup>2</sup>, 王智<sup>2</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 张少峰<sup>1\*</sup>

(1. 河北工业大学海洋科学与工程学院, 天津 300130; 2. 河北工业大学化工学院, 天津 300130)

**摘要:**基于自回热理论设计出适合于沸点升高较小的含盐溶液的两效机械蒸汽再压缩(MVR)蒸发系统,分析表明,相同工况下该系统与单效MVR蒸发系统相比平均节约50.6%的能量消耗。同时,考察了物料沸点升、压缩机压缩比、进料温度对系统COP、总换热面积的影响。研究表明,根据物料沸点升高的不同,选择合适的压缩比有助于合理安排设备投资和操作费用;同时得出设计条件下的最佳进料温度为72.5℃。

**关键词:**自回热;两效;机械蒸汽再压缩;节能

**中图分类号:**TQ51

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2016)05-0130-03

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.05.033

## Performance analysis of two-stage mechanical vapor recompression evaporation system

LIU Yan<sup>1</sup>, PEI Cheng-lin<sup>2</sup>, WANG Zhi<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Shao-feng<sup>1\*</sup>

(1. School of Marine Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Department of Chemical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** A new two-stage mechanical vapor recompression (MVR) system is proposed based on the theory of self-heat recuperation. This new system is suited to concentrate solutions with boiling elevation less than 8℃. The actual energy consumption of the new system is decreased by 50.6%, compared with one-stage MVR system. The effects of the boiling point elevation of solution, the compression ratio of the compressor and the feed temperature on the COP and the total heat exchange area are discussed. The results show that the appropriate choice of compression ration can reduce the equipment investment and operation cost evidently, according to the difference of the boiling point elevation. The optimal feed temperature is 72.5℃ under the current condition.

**Key words:** self-heat recuperation theory; two-stage; mechanical vapor recompression; energy saving

蒸发浓缩属于高能耗的过程单元,蒸发浓缩余热直接排放至环境中不仅造成巨大的能量浪费,也会对环境造成热污染,对余热的回收利用是降低过程能耗的关键<sup>[1-2]</sup>,目前对余热再利用的主要技术有多效蒸发(MEE)、热力蒸汽再压缩(TVR)、机械蒸汽再压缩(mechanical vapor recompression, MVR)等。2009年,日本东京大学的Kansha等<sup>[3]</sup>提出一种“自回热”理论,自回热理论是将系统自身所含有的能量进行循环利用,而不需要外界输入能量的节能设计理论<sup>[4]</sup>。Mizuno等的研究表明<sup>[5]</sup>,基于自回热理论的热法海水蒸发过程能耗约为传统过程的1/4,且能耗随着自由水回收率增加而降低,节能效果显著。吴易飞等<sup>[6]</sup>、Han等<sup>[7]</sup>将自回热理论应用于MVR蒸发浓缩过程,取得了良好的节能效果。目前,MVR蒸发系统以单效为主,蒸发过程能耗依然较高,同时压缩机提升二次蒸汽温度的能力有限,且溶液存在沸点升高,有效传热温差低,设备投资

高。本文中针对溶液沸点升高在8℃以内的溶液,应用自回热理论于溶液的蒸发浓缩过程,结合单效MVR蒸发和传统两效蒸发系统,设计了两效MVR蒸发系统,旨在降低蒸发浓缩过程能耗,同时研究运行参数对系统性能的影响,为进一步降低蒸发浓缩过程能耗提供参考。

## 1 两效单体MVR蒸发系统

基于系统自身热量循环利用的自回热的设计思想<sup>[8]</sup>,以传统两效蒸发系统和单效MVR蒸发系统为基础,设计出如图1所示新工艺过程,称其为两效MVR蒸发系统。两效MVR系统处于稳定运行状态时的物料经冷凝水和浓溶液预热后,依次通过一效、二效蒸发器。一效蒸发器产生的二次蒸汽4进入二效蒸发器,作为其加热蒸汽;二效蒸发器产生的二次蒸汽5进压缩机,提高其温度和压力后,作为一效蒸发器的加热蒸汽,使二次蒸汽5中所含的潜热得到

收稿日期:2015-11-27;修回日期:2016-03-02

基金项目:河北省科技支撑计划项目(14273105D);河北省自然科学基金项目(D2014202074)

作者简介:刘燕(1970-),女,副教授,研究方向为过程强化与优化,Julia\_liuyan@hebut.edu.cn;张少峰(1965-),男,博士,教授,研究方向为化工过程多相流,通讯联系人,022-60204274,shfzhang@hebut.edu.cn。

有效利用,避免了直接冷凝造成的热量损失。浓缩后的物料从二效蒸发器中排出。系统稳定运行时,其能耗主要是压缩机所消耗的电能。

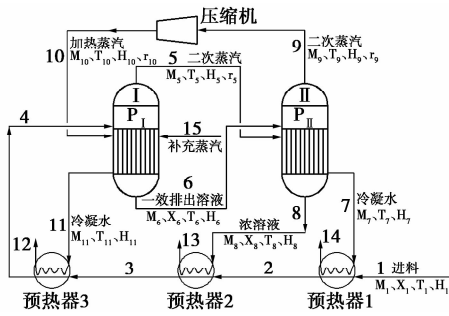


图1 两效MVR蒸发工艺流程示意图

## 2 模型建立

### 2.1 系统能量平衡

两效MVR系统能量平衡:

$$Q_{e1} + Q_{e2} + M_1 H_1 = M_{12} H_{12} + M_{13} H_{13} + M_{14} H_{14} \quad (1)$$

式中,  $Q_{e1}$ 、 $Q_{e2}$ 分别为压缩机和补充蒸汽输入的能量, kJ;  $H_i$ 为焓, kJ/kg。

### 2.2 压缩机功率模型

压缩机功率模型<sup>[9-10]</sup>:

$$W = \xi [\kappa / (\kappa - 1)] \cdot (P_9 V_9 / \eta_c) [(P_9 / P_{10})^{(\kappa-1)/\kappa} - 1] \quad (2)$$

式中,  $W$ 为压缩机功率, kW;  $P_9$ 、 $P_{10}$ 为进出口压力, kPa;  $\kappa$ 为绝热系数;  $\eta_c$ 为绝热效率;  $\xi$ 为机械效率。

### 2.3 系统制热能效比(COP)模型

制热能效比(COP)反映的是整个系统的技术经济性能,是系统蒸发能耗和压缩机功耗的比值,该系数表征的是整个系统对能量的利用情况,其值越大,系统对能量的利用率就越高,COP的表达式<sup>[11]</sup>:

$$COP = (M_9 \cdot r_9 + M_5 \cdot r_5) / (Q_{e1} + Q_{e2}) \quad (3)$$

### 2.4 系统总能耗模型

在相同工况条件下,为便于比较两效MVR蒸发系统和单效MVR蒸发系统的总能耗,将压缩机电耗和补充蒸汽折算成标准煤用量,表达式为<sup>[12]</sup>:

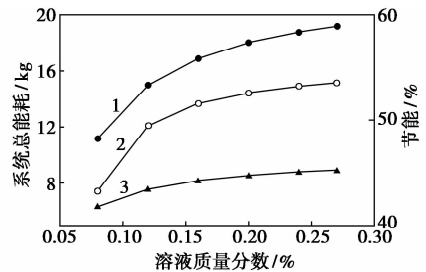
$$E = 0.404W + 0.145M_{15} \quad (4)$$

式中,  $E$ 为系统标准煤消耗量, kg。

## 3 结果和讨论

基于自回热理论设计的两效MVR蒸发系统,以蒸发浓缩氯化钠溶液为例,在相同工况下,以单效MVR蒸发作为参比,其运行基础参数:①进料参数  $T_1 = 72.5^\circ\text{C}$ ,  $M_1 = 1\,000\text{ kg}$ ,  $P_1 = 100\text{ kPa}$ ,  $X_1 = 0.04$ ; ②压缩机绝热效率和机械效率分别取0.8和0.9<sup>[13]</sup>; ③二效蒸发压力为70 kPa。

系统稳定运行时,2种蒸发系统能耗如图2所示。由图2可以看出,随着溶液质量分数的增加,蒸发量增加,2种系统的能耗均增加,两效MVR蒸发系统相较于单效MVR蒸发的节能率逐渐增加,因为两效MVR系统增加了对二次蒸汽4所含潜热的再循环利用,其压缩机的进气量减少,压缩机能耗降低,系统总能量消耗降低,相同工况下平均节约50.6%的标准煤消耗量。

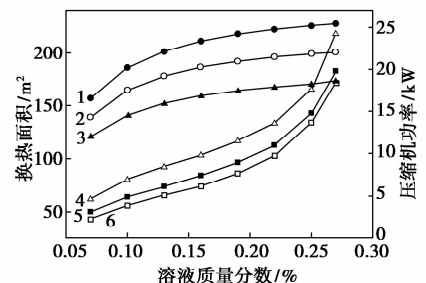


1—单效MVR系统能耗;2—两系统能耗比;  
3—两效MVR系统能耗

图2 两种蒸发系统能耗对比

### 3.1 压缩比对系统的影响

两效MVR蒸发系统,核心设备是压缩机和蒸发器,压缩机压缩比是影响压缩机能耗的主要因素。选择压缩机压缩比时同时应考虑溶液沸点升高的影响,这是由于溶液沸点升高的存在,有效传热温差减小,有效传热温差进而影响总换热面积。相同工况下,不同压缩比对系统压缩机能耗和系统总换热面积的影响如图3所示,随着溶液质量分数的增加,蒸发量增加,系统压缩机能耗增加,同时溶液沸点升高增加,传热温差减小,总换热面积均增加;溶液质量分数相同时,增加压缩机压缩比,压缩机能耗增加,同时总换热面积降低。压缩机压缩比增加,压缩机进口蒸汽压力不变,出口压力增加,压缩机功率增加,出口蒸汽压力增加,温度升高,传热温差增加,总换热面积降低。

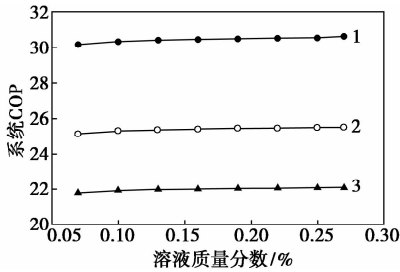


1—压缩比2.2时压缩机功率;2—压缩比2.0时压缩机功率;  
3—压缩比1.8时压缩机功率;4—压缩比2.2时换热面积;  
5—压缩比2.0时换热面积;6—压缩比1.8时换热面积

图3 压缩比对系统性能的影响

### 3.2 压缩比对制热能效比 (COP) 的影响

在相同工况下,两效 MVR 蒸发系统压缩比对系统 COP 的影响如图 4 所示,随着溶液质量分数的增加,系统 COP 基本稳定,表明系统稳定运行时性能稳定。压缩比增加,系统 COP 降低,系统对能量的利用效率降低。这是由于溶液质量分数相同时,蒸发量相同,系统可循环利用的能量相同,压缩比增加,压缩机能耗增加,因此系统 COP 降低。综合考察蒸发器物料性质,以及压缩比对系统 COP、压缩机能耗、蒸发器总换热面积的影响,选择合理的压缩比,对两效 MVR 蒸发系统设计、设备投资以及运行费用具有一定的经济意义。

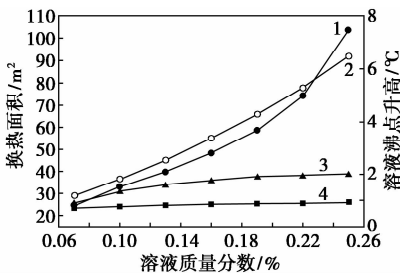


1—压缩比 1.8 时系统 COP;2—压缩比 2.0 时系统 COP;  
3—压缩比 2.2 时系统 COP

图 4 压缩比对系统 COP 的影响

### 3.3 一效、二效蒸发器换热面积

两效 MVR 蒸发系统中溶液质量分数增加,溶液沸点升高逐渐增加,有效传热温差降低,对一效、二效蒸发器换热面积的影响如图 5 所示,随着溶液质量分数的增加,溶液沸点升高增加,同时有效传热温差减小,一效、二效蒸发器的换热面积均增加。其中,一效蒸发器换热面积增加缓慢,对总换热面积影响较小;二效蒸发器换热面积急速增加,是影响总换热面积增加的主要因素。在溶液质量分数逐渐增加的过程中,溶液在一效蒸发器中蒸发,溶液总量较大,相同蒸发量引起的溶液质量分数增加较小,溶液沸点升高增速也较小,基本保持稳定,对有效传热温



1—二效换热面积;2—二效溶液沸点升高;  
3—一效换热面积;4—一效溶液沸点升高

图 5 溶液浓度对各换热面积的影响

差的影响较小,所需换热面积增加缓慢;溶液在二效蒸发器中蒸发,由于溶液总量减少,相同蒸发量引起的溶液质量分数增加较大,溶液沸点升高也增大,对有效传热温差的影响大,换热面积增加迅速,是影响总换热面积主要因素。

### 3.4 系统进料温度的影响

对两效 MVR 蒸发系统,稳定运行时主要能耗为压缩机的电能,辅之少量蒸汽对进料预热。忽略系统热损失,进料温度对补充蒸汽的影响如图 6 所示,正数表示外界向系统补充蒸汽,负数表示系统向外界排出蒸汽。当进料温度低时,需要外界补充蒸汽预热进料至泡点状态,随着进料温度的增加,外界向系统补充的蒸汽逐渐减少,当进料温度增加到一定程度后,系统不再需要外界补充蒸汽而能维持稳定运行。当进料温度继续增加,由于压缩机压缩蒸汽后,出口蒸汽有一定的过热度,过热蒸汽作为生蒸汽会降低传热系数,需要喷入一定量的冷凝水,使出口蒸汽至微过热或者饱和状态,当喷入的冷凝水气化后产生的蒸汽量超过预热进料所需的蒸汽量时,系统向外界排出蒸汽。排出蒸汽部分的能量是由压缩机提供的,这无形中增加系统总能耗,因此进料温度应稳定在使补充蒸汽量为零的状态,此状态下的进料温度为系统最佳进料温度。本文中设计条件下,维持系统稳定运行,最佳进料温度为 72.5℃,此时系统不需要补充蒸汽,也不向外界排出蒸汽。

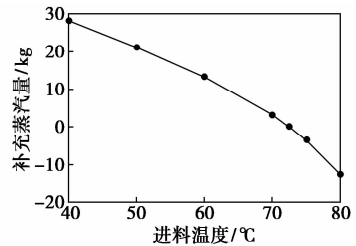


图 6 进料温度对系统补充蒸汽的影响

## 4 结论

应用自回热理论,以传统两效蒸发和单效 MVR 蒸发系统为基础,设计两效 MVR 蒸发工艺系统,用于处理不含挥发性溶质溶液的蒸发浓缩,并与单效 MVR 蒸发对比,得出如下结论。

(1)两效 MVR 蒸发系统,相同工况下系统运行能耗相较于单效 MVR 蒸发系统,平均节约 50.6% 的能量消耗。

(2)两效 MVR 蒸发系统应综合考虑物料沸点升高、压缩比对系统 COP、能耗、总换热面积的

(下转第 134 页)

压缩机升压后,经第二入塔预热器预热后进入第二甲醇合成塔,该反应气同样副产 1.8~2.3 MPa 的饱和蒸汽,离开第二甲醇合成塔的反应气经第二入塔预热器预热入塔气后,经冷却后进入第二甲醇分离器分离。分离出的大部分循环气与新鲜合成气混合后进入第一合成回路,并同时释放出一部分驰放气。2 台甲醇分离器分离出的粗甲醇去甲醇闪蒸槽。

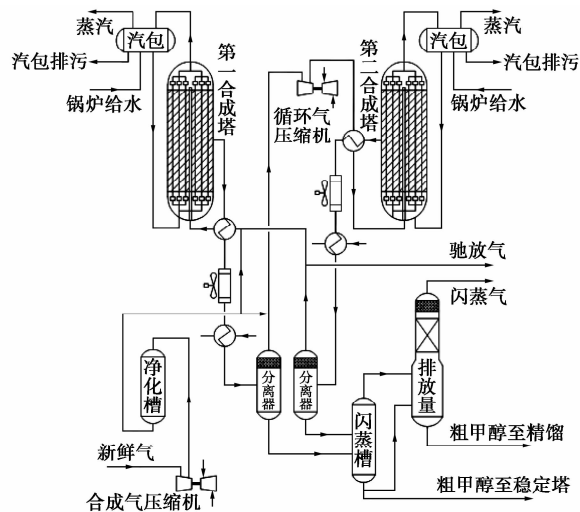


图1 戴维甲醇合成流程示意图

神华内蒙古某煤化工项目设有 2 台甲醇合成塔,结构形式完全相同。该塔采用管束作为冷却换热元件,换热管内走冷却水移走甲醇合成反应热,产

生中压饱和蒸汽。从甲醇合成塔中心到壳体依此同心布置气体分布器、换热管束和气体收集器。催化剂布置在换热管外,从塔顶部人孔填装,管束底部填装惰性瓷球用于支撑催化剂,更换催化剂时,从塔底部人孔卸出。冷却系统包括合成塔内的管束、汽包、上升管和下降管,采用蒸汽动力自循环,不需要外部动力。该合成塔由专利商指定的国外设备供应商制造,在专利商指导下在项目现场填装催化剂和安装气体分布器<sup>[2]</sup>。

该塔工艺设计参数如下:最大操作温度为 317℃(壳程)和 240℃(管程);最大操作压力为 7.61 MPa(壳程)和 3.35 MPa(管程),设计压力为 8.9 MPa(壳程)和 -0.1~4.0 MPa(管程),设计温度为 330℃(壳程)和 260℃(管程),壳程介质为变换合成气和甲醇蒸气,管程介质为蒸汽和水,设备直径约为 3.8 m,筒体切线长度约为 14 m,结构形式为立式,采用中间裙座支撑。壳程合成气入口设置在底部,在筒体上设置 4 个气体出口,设置 4 个冷却水入口,位于塔底部,对应地设置 4 个水/蒸汽出口,位于塔顶部。内件包括管束、气体分布器、气体收集器、催化剂框、开工喷射器以及热电偶等。壳体材料为 SA387 Gr. 22 Cl. 2,换热管材料为碳钢,管板材料为 SA336 Gr. F11 Cl. 3 + 堆焊碳钢,采用应力分析法进行设计和制造,其结构形式如图 2 所示。

(上接第 132 页)

影响,根据物料沸点升高,选择合适的压缩比有助于合理安排设备投资和操作费用。

(3) 维持进料温度处于最佳进料温度有助于减少系统能耗,本文中设计条件下,氯化钠溶液的进料温度为 72.5℃。

## 参考文献

- [1] Hiroyuki Mizuno, Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, *et al.* Agglomeration behluidized-bed evaporator for thermal seawater desalination [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 1(8): 1-8.
- [2] Yasu Zhou, Chengjun Shi, Guoqiang Dong. Analysis of a mechanical vapor recompression wastewater distillation system [J]. *Desalination*, 2014, 353: 91-97.
- [3] Kansha Y, Tsuru N, Sato K, *et al.* Self-heat recuperation technology for energy saving in chemical processes [J]. *Ind Eng Chem Resour*, 2014, 21: 43-50.
- [4] Kansha, Kishimoto A, Tsutsumi A. Application of the self-heat recuperation technology to crude oil distillation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 43: 153-157.
- [5] Mizuno H, Kansha Y, Kishimoto A, *et al.* Thermal seawater desali-

nation based on self-heat recuperation [J]. *Clean Techn Environ Policy*, 2013, 15(10): 765-769.

- [6] 吴易飞, 韩东, 何玮峰, 等. 维生素低温蒸发结晶单元的自回热设计分析 [J]. *化工学报*, 2014, 65(12): 4831-4838.
- [7] 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.
- [8] Han D, He W, Yue Ch, *et al.* Analysis of energy saving for ammonium sulfate solution processing with self-heat recuperation principle [J]. *Appl Energy*, 2014, 73: 641-649.
- [9] Martin Fehlau, Specht E. Optimization of vapor compression for cost savings in drying processes [J]. *Chemical Engineering Technology*, 2011, 23(10): 901-908.
- [10] 梁林. 处理高浓度含盐废水的机械蒸汽再压缩系统设计及性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [11] 韩东, 彭涛, 梁林, 等. 基于机械蒸汽再压缩的硫酸铵蒸发结晶实验 [J]. *化工进展*, 2009, 28(s1): 187-189.
- [12] 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.
- [13] 顾永泉. 石油化工用离心式压缩机的效率及选取 [J]. *华东石油学院学报*, 1981, (2): 61-69. ■