

文章编号: 2095-0411 (2013) 03 - 0050 - 03

基于机械蒸汽再压缩热泵的 DMAC 水溶液 浓缩工艺模拟^{*}

侯 涛

(常州大学化工设计研究院, 江苏 常州 213016)

摘要: 分析了蒸汽机械再压缩 (MVR) 热泵浓缩工艺的节能原理和适用工况, 并以 DMAC 水溶液的浓缩为研究对象, 提出了三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺。采用 Aspen Plus 过程模拟软件中的 Compr 压缩机模块和 Radfrac 精馏模块, 并以能耗最低为目标函数, 对三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺和三效蒸馏蒸发浓缩工艺分别进行了模拟与优化, 得到了合适的工艺操作参数。研究表明, 与三效蒸馏蒸发浓缩工艺相比, 三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺节能约 68.7%, 其平均能效比 COP 值为 0.863。多效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺具有较大的经济优势。

关键词: DMAC 水溶液; MVR 热泵蒸馏浓缩; 三效蒸馏浓缩; 流程模拟; 节能

中图分类号: TQ 028

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2013.03.013

Concentration Process Simulation of DMAC Water Solution Based on the MVR Heat Pump

HOU Tao

(Institute of Chemical Engineering Design of Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: The energy-saving principle and applied working conditions of heat pump concentration technology of mechanical vapor recompression (MVR) is analyzed. The object of this study is the concentration of DMAC water solution, and the triple effect MVR heat pump distillation concentration process is introduced, simulating Compr compressor module and Radfrac distillation module by Aspen plus, with minimum energy consumption as the objective function, optimized triple effect MVR heat pump distillation concentration process and triple effect distillation evaporation and concentration process, the suitable technical parameters is established. The research results showed that the triple-effect MVR heat pump distillation and concentration process could save energy by 68.7% compared with the triple effect distillation evaporation and concentration process, the average COP reached 0.863, and the multi-effect MVR heat pump distillation concentration technology had great economic advantages.

Key words: DMAC water solution; MVR heat pump distillation concentration; triple effect distillation concentration; process simulation; energy-saving

机械蒸汽再压缩 (MVR) 是利用高能效蒸汽 压缩机压缩蒸发系统产生的二次蒸汽, 通过提高二

* 收稿日期: 2012 - 12 - 11

作者简介: 侯涛 (1978—), 女, 江苏泰兴人, 工程师。

次蒸汽的焓，使得提高了热焓的二次蒸汽进入蒸发系统作为热源循环使用的一项节能技术。其中二次蒸汽替代绝大部分生蒸汽，从而大幅度降低蒸发器的生蒸汽消耗，达到节能目的^[1-5]，同时还省却了冷却水系统。MVR 热泵技术目前广泛用于海水淡化、浓缩乳制品、食品加工以及物料浓缩方面^[6-9]。本文对 DMAC 水溶液的浓缩工艺进行了模拟，对多效蒸馏浓缩和多效机械蒸汽再压缩热泵蒸馏浓缩进行了比较，研究发现多效机械蒸汽再压缩热泵蒸馏浓缩具有较好的节能优势。

1 MVR 系统及节能原理

MVR 热泵蒸馏浓缩如图 1 所示，它将塔顶的二次饱和蒸汽经压缩机加压、升温，然后送到蒸发器塔底与进料液换热冷凝。蒸汽的汽化潜热随压力的变化很小，在 0.1MPa 下，饱和蒸汽的汽化潜热是 2 257.6kJ/kg。理论上，将 0.1MPa，100℃ 的饱和水蒸汽通过压缩，压力达到 0.16MPa 时温度升高 13℃ 左右，所需压缩功 90.5kJ/kg。由于提高了蒸汽冷凝温度，使得它可以同原料液换热冷凝，可回收了该蒸汽的汽化潜热 2 257.6kJ/kg，理论上达到 24~25 的热功比，即消耗少量的机械能可回收利用大量的蒸汽潜热，而出口的冷凝液仍然可以经过减压阀进入闪蒸罐闪蒸，产生饱和蒸汽预热原物料，进一步回收热量。

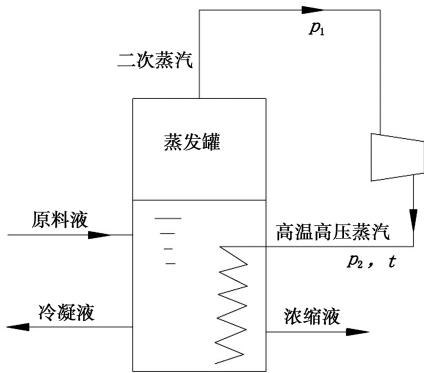


图 1 MVR 热泵蒸馏浓缩示意图

Fig. 1 Scheme of MVR heat pump distillation concentration

MVR 系统规定塔底换热传热温差在 10~15℃ 之间，若温差太小，所需的换热面积增加，设备投资加大；反之若温差太大，压缩机的功耗就会大幅度增加，操作费用也会随之加大，蒸汽压缩机的压缩比一般不会超过 2，因此，10~15℃ 之间的传热温差是最为经济的。

本文在 MVR 热泵蒸馏浓缩的基础上提出了多效 MVR 热泵蒸馏浓缩方案。下面以三效 MVR 热

泵蒸馏浓缩工艺为例说明。工艺流程见图 2，料液进入单效脱水塔 T101，在压缩蒸汽的加热下料液中的水份受热汽化，塔顶蒸汽进入单效压缩机 C101 压缩后，与塔底物料进行换热，释放潜热冷凝成饱和液体，小部分回流入塔，大部分作为废水排出。单效脱水塔 T101 塔底物料进入双效脱水塔 T102，依次类推，最后在三效脱水塔 T103 塔底得到浓缩液。

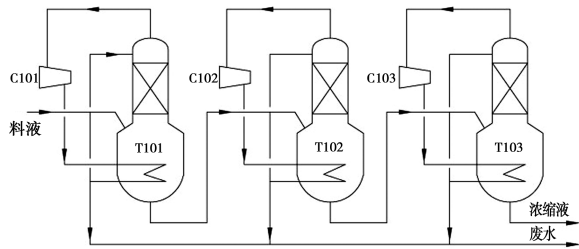


图 2 三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺流程

Fig. 2 The process flow of triple-effect MVR heat pump distillation concentration

2 热泵蒸馏浓缩工艺

2.1 模拟规定

分离的物料如下：进料量 2 万 t/a，常温常压，其中含 DMAC35%，水 65%。规定蒸出的废水中 DMAC 含量 $\leq 10 \times 10^{-6}$ ，物性的选择将影响模拟结果准确性。对于极性体系，一般用 WILSON 方程、NRTL 方程及 UNQUIC 方程等计算相平衡数据。通过体系在 101.3kPa 下的汽液平衡数据和文献 [10] 中提供的数据进行比较，发现用 ASPEN PLUS 数据库中的 WILSON 方程计算值与文献值基本一致，因而选用 WILSON 物性作为计算模型。

2.2 模拟结果

选用 Aspen Plus 软件中的严格精馏模型 Radfrac 模拟脱水塔、等熵压缩机模拟蒸汽压缩机以及采用 WILSON 方程计算汽液相平衡数据对三效蒸馏浓缩工艺和三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺进行了模拟，结果见表 1 和表 2。

MVR 热泵系统的能效比 COP (coefficient of performance) 定义为压缩机制热量与压缩机输入功率的比率。从表 2 的数据可以看出，随着操作压力和温度的降低，MVR 热泵系统的值也随之减小，这是因为在低压工况下，蒸汽的体积加大，势

必要提高压缩比，导致压缩机功耗加大。因此在低压和低温工况下，采用 MVR 热泵浓缩工艺不合适。

表 1 三效蒸馏浓缩工艺模拟结果

Table 1 Simulation results of triple-effect distillation concentration process

参数	单效浓缩塔	双效浓缩塔	三效浓缩塔
操作压力/kPa	101.3	79.0	6.08
回流比	0.5	0.5	2.15
塔顶温度/℃	116.9	92.0	36.2
塔底温度/℃	122.8	106.0	83.2
传热温差/℃	5.9	14.0	47.0
蒸发的水量/(kg/h)	650	674	318
塔顶废水中 DMAC 含量	57	4	87
塔顶热负荷/kW	601.1	642.3	672.7
塔底热负荷/kW	595.6	601.1	642.3

表 2 三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺模拟结果

Table 2 Simulation results of triple-effect MVR heat pump distillation concentration process

参数	单效浓缩塔	双效浓缩塔	三效浓缩塔
塔操作压力/kPa	101.3	79.0	6.08
压缩机进口压力/kPa	101.3	79.0	6.08
压缩机出口压力/kPa	162.1	101.3	20.26
压缩蒸汽冷凝温度/℃	113.5	113.2	60.1
塔底物料汽化温度/℃	103.1	103.2	49.8
蒸汽焓增/(kJ/kg)	119	181	278
蒸发的水量/(kg/h)	650	663	400
回流比	0.333	0.337	0.83
压缩机功耗/kW	32.22	50.19	65.58
能效比	0.889	0.888	0.811
塔顶废水中 DMAC 含量	8×10^{-6}	1×10^{-6}	5×10^{-6}

由于 MVR 热泵浓缩工艺没有用到任何加热蒸汽（系统启动时用到）和冷却水，因而总的操作费用即为压缩机的功耗，压缩机总的功耗为 148kW，则处理每吨稀 DMAC 水溶液消耗的电量 58.5kW·h。按 1t 煤发电量为 2 500kW·h 计算，则三效 MVR 热泵蒸馏浓缩蒸发每吨水相当于消耗标煤分别约 19.8、30.2、38.5kg，则平均消耗标煤约为 29.5kg，可见经济优势是非常明显的。

由于三效蒸馏浓缩工艺的能量平衡主要取决于第一效的蒸发量，所以若第一效的蒸发量加大（即回流比加大），则二效和三效的回流比同样会增大，分离效果会变好，但能耗也会随之增加。同样规定三塔的操作压力分别为 101.3、79.0 和 6.08kPa，在满足浓缩要求的前提下，通过优化模拟，得到了一效脱水塔的最小回流比。模拟结果见表 1，表中的传热温差即为相邻两塔前面一塔的塔顶温度与后面一塔的塔底温度之差。三效浓缩工艺的操作费用即为一效脱水塔塔底蒸汽费用和三效脱水塔的塔顶

冷却水费用。模拟得到一效脱水塔塔底热负荷为 595.6kW，则处理每吨稀 DMAC 水溶液消耗的电量约为 235.4kW·h。折合成标煤，则蒸发每吨水消耗标煤约为 94.2kg，该项尚未计入冷却水费用。

3 结 论

①通过对 MVR 热泵蒸馏浓缩 DMAC 水溶液工艺的分析，结合模拟计算结果，认为采用三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺较为合理；②常压或近常压工况条件下 MVR 热泵系统的能效比 COP 值较低压低温工况条件下的 COP 值要高；③采用三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺，其平均消耗标煤约为 29.5kg；而采用三效蒸馏浓缩工艺，其消耗标煤约为 94.2kg。三效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺可节能约 68.7%，可见多效 MVR 热泵蒸馏浓缩工艺的节能效果是非常明显的。

参考文献：

[1] Mabrouk A A, Nafey A S, Fath H E S. Thermoeconomic analysis of some existing desalination processes [J]. Desalination, 2007, 205 (1-3): 354-373.

[2] Aly N H, El-Fiqi A K. Mechanical vapor compression desalination systems: A case study [J]. Desalination, 2003, 158: 143-150.

[3] El-Dessouky H, Ettouney H, Al-Fulaij H, et al. Multi-stage flash desalination combined with thermal vapor compression [J]. Chemical Engineering and Processing, 2000, 39: 343-356.

[4] Aybar H S. Analysis of a mechanical vapor compression desalination system [J]. Desalination, 2002, 142: 181-186.

[5] 庞卫科, 林文野, 戴群特, 等. 机械蒸汽再压缩热泵技术研究进展 [J]. 技能技术, 2012, 30 (174): 312-315.

[6] Hisham Ettouney. Design of single-effect mechanical vapor compression [J]. Desalination, 2006, 190: 1-15.

[7] Mabrouk A A, Nafey A S, Fath H E S. Analysis of a new design of a multi-stage flash-mechanical vapor compression desalination process [J]. Desalination, 2007, 204: 482-500.

[8] Nafey A S, Fath H E S, Mabrouk A A. Thermoeconomic design of a multi-effect evaporation mechanical vapor compression (MEE-MVR) desalination process [J]. Desalination, 2008, 230: 1-15.

[8] 李树生, 吴宗生. 滩田饱和卤水机械蒸汽再压缩发工艺研究 [J]. 盐业与化工, 2009, 38 (1): 18-20.

[9] 梁林, 韩东. 蒸汽机械再压缩蒸发器的实验 [J]. 化工进展, 2009, 28: 358-360.

[10] Perry R. Chemical Engineering Manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.