

文章编号:2095—0411(2015)01-0076-05

机械蒸汽再压缩(MVR)热泵技术的应用进展^{*}

杨德明,叶梦飞,谭建凯,王 颖,高晓新

(常州大学 石油化工学院,江苏 常州 213164)

摘要:介绍了机械蒸汽再压缩(MVR)热泵技术的节能原理及应用优势,概述了该技术在制盐、乳液浓缩、造纸、固体干燥、海水淡化及蒸馏等领域的应用现状,探讨了 MVR 热泵技术在实际应用中要关注的几个问题。并以仲丁醇-异丁醇小温差体系的分离为案例,应用 MVR 热泵精馏工艺,进行了能耗计算与分析,结果表明,MVR 精馏工艺比双效精馏工艺节能约 66%,预示着 MVR 热泵技术在节能领域具有潜在的巨大经济优势。

关键词:机械蒸汽再压缩;热泵;应用;节能

中图分类号:TQ 028

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.2095—0411.2015.01.015

Application Progress for Mechanical Vapor Recompression Heat Pump Technology

YANG De-ming, YE Meng-fei, TAN Jian-kai, WAN Ying, GAO Xiao-xin

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

Abstract: The energy saving principle and application advantages for mechanical vapor recompression (MVR) heat pump technology were introduced, and the development of MVR heat pump technology in salt manufacturing, emulsion concentration, papermaking, drying of solids, seawater desalination and distillation were summarized, and several problems for application of MVR heat pump technology were discussed. The simulations for separation of small temperature difference system such as butanol-isobutanol were performed, and the energy consumption was gained. The research results showed that the MVR heat pump distillation process can save energy by 66% compared with the double effect distillation process, it promised that the MVR heat pump technology has great economic potential.

Key words: mechanical vapor recompression(MVR); heat pump; application; energy saving

机械蒸汽再压缩(MVR)热泵技术是目前极具潜力的高效节能技术,其优势在于工艺简单,运行成本低,回收热量的同时省去了冷却系统,因而占地面积小,并且减小了蒸汽锅炉供热燃煤所带来的环境污染,再者电力品种的来源趋于多元化^[1],而煤炭价格却日趋上涨。在能源紧缺的当前,MVR 热泵技术的应用前景相当乐观。然而国内由于起步较晚,

且受到国外技术封锁,该技术发展尚不成熟,目前已受到越来越多学者的关注,MVR 热泵技术的应用在我国尚处于初级阶段。

1 MVR 热泵技术节能原理

MVR 热泵技术的工作原理是将低温位的蒸汽经压缩后,升压升温以提高蒸汽的品位,用于设备供

^{*} 收稿日期:2014-04-28。

作者简介:杨德明(1966—),男,江苏苏州人,教授。通讯联系人:高晓新(1979—),E-mail:gaoxiaoxin@cczu.edu.cn

热。而蒸发产生的低压蒸汽经压缩机再次将其“泵”回到高温位热能中,如此反复,充分利用了蒸汽的潜热,达到高效节能的目的^[2-3]。

MVR 热泵系统如图 1 所示,主要由蒸发器(如蒸馏塔底再沸器)和蒸汽压压缩机构成,蒸发器产生的蒸汽进入压缩机压缩后,提高了蒸汽的温度,进而作为蒸发器的热源。压缩后的蒸汽提供给蒸发器的热量为 $\Delta H = H_1 - H_2$,而压缩机的消耗功为 W ,由于热功比($\Delta H/W$)一般都很大,因而可以达到大幅度节能的目的。庞卫科等^[4]将 MVR 热泵系统工作时回收利用的潜热值与输入的机械功之间作了比较,理论上热功比达到 24.9。工质的热焓仅增加 0.8%,而温度却提高了 13%,相当于输入少量机械能,却把大量的低温位的热能转化成为可利用的高温位热能,提高了能源利用率。

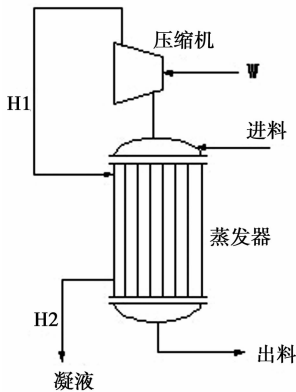


图 1 MVR 热泵系统
Fig. 1 MVR heat pump system

2 MVR 热泵技术的应用

早在 19 世纪国外就已制造出 MVR 热泵装置并投入实际运行,经过多年发展,MVR 热泵技术已经在众多领域展现出其良好的节能效果。目前,MVR 热泵技术在各领域中的应用实质上是 MVR 蒸发器技术的应用。比如,食品行业(牛奶、乳清、糖溶液的蒸发)、造纸工业(黑液的蒸发)、制盐工业(盐溶液的蒸发)、环保技术(废水的浓缩)等。另外,在有效温差要求较小的蒸馏体系、固体干燥等方面也有着重要的应用及发展空间。

2.1 MVR 热泵技术在制盐工业中的应用

制盐工业是高能耗行业而,目前国内普遍采用的是技术成熟的多效真空蒸发(ME)制盐技术。然而在国外,机械压缩式(MVR)热泵制盐技术已经取得了质的飞跃。两种技术都可以很大程度地降低能

耗,但 MVR 技术的节能优势更为明显,且热力学效率也比较高^[5-6]。中盐金坛公司是目前国内唯一一家将 ME 和 MVR 技术并用于生产,且能达到稳定运行的企业。该企业在核算汽、电价成本的基础上,在二期工程中采用了新的 MVR 技术,于 2010 年建成并投产运行。徐敏等^[7]根据该公司实际生产情况,将 ME 技术和 MVR 技术的能耗做了比较,结果显示,ME 吨盐平均消耗为 99.58kg 标煤,MVR 吨盐平均消耗为 79.07kg 标煤,MVR 热泵效益显而易见。

在实际制盐过程中,有以下几点技术问题需要注意:①二次蒸汽夹带料液会对压缩机叶轮造成冲击、腐蚀、结垢。张家坝制盐化工厂引进的我国第一套热泵制盐装置就发生过压缩机转子结垢问题^[8]。②卤水的沸点会随着蒸发的进行而升高。若温度要求过高,就需要采用多级式压缩机,投资相应增加,可以适当降低传热温差,增加换热面积,合理控制好投资与效益比^[9]。

2.2 MVR 热泵技术在乳液浓缩中的应用

在食品加工行业有很多乳浆液蒸发浓缩过程,耗能巨大。比如玉米浆、果汁、蔬菜汁和乳制品等的蒸发浓缩^[10-11]。这些行业的蒸发过程中,物料一般具有热敏性、不宜高温加热、物料浓度高、流动性差、传热速率低等特点。对于蒸发量要求很大的装置采用 MVR 系统回收二次蒸汽具有较高的经济效益;而对压缩比要求也低,可以以较低的功率回收大量热量。常采用的蒸发器是管式降膜蒸发器和板式蒸发器两种,二次蒸汽经压缩机压缩后返回蒸发器供热。通常为了达到高浓缩目的,会采用多级蒸发方式浓缩。也有采用多效蒸发,将中间级或者末级蒸汽压缩用于第一级蒸汽加热,不同的方案根据实际情况选择利用。

董守亮等^[12]针对目前液态奶蒸发浓缩领域的能耗高、热效率低等缺点,提出了基于 MVR 技术的液态奶蒸发浓缩系统,设计了基于 MVR 技术的蒸发工艺流程,采用火用分析模型对系统及各个部件进行了能效分析,研究结果认为 MVR 乳品蒸发系统应尽量采用较小压缩比的压缩机和维持较高的蒸发温度。

2.3 MVR 热泵技术在造纸工业中的应用

造纸工业虽然不同于化工、炼油等“高能耗、高污染”行业,但造纸行业也存在几个能源消耗较大的

节点,比如在化学制浆黑液蒸发、化学机械制浆废水预浓缩过程中会产生大量难以直接用于生产的二次低压蒸汽,若是通过机械蒸汽再压缩热泵回收二次蒸汽热量,可以大大提高节能效果^[13]。

稀黑液由于浓度低、粘度小、沸点升高小等特点,可以采用 MVR 热泵蒸发器作为预浓缩装置。中国制浆造纸研究院^[14]对造纸草浆黑液进行蒸发实验:固形物含量从 10.7%浓缩至 40%时,热泵技术与 4 效蒸发相比较,综合能耗低 40%。

太阳纸业^[15]为提高化机浆废水浓度,选择机械蒸汽再压缩蒸发器用作一段蒸发设备,使其浓缩至 15%,再与化学浆黑液混合后浓缩至 45%,经过碱回收系统,回收碱的同时热量也得到了充分的再利用,实现了化学机械浆废水零排放的目的。该项目 MVR 运行成本为 12.12 元/t,而 MEE(8 效蒸发)为 20.8 元/t。

2.4 MVR 热泵技术在固体干燥中的应用

固体干燥过程产生大量水蒸汽,而这部分水蒸汽携带了大量潜热,因此回收利用蒸汽潜热成为该操作节约能耗的一大着眼点。MVR 热泵系统在蒸发领域的成功应用即是对蒸汽潜热的回收,为此将 MVR 热泵技术应用于固体干燥有着巨大的发展潜力以及经济效益。

传热问题是固体干燥的重难点,另外为保证产品质量,尤其是热敏性固体,还要严格控制好干燥温度和干燥速度。戴群特等^[16]为同时保证快干燥速度和高能效比,提出了 MVR 热泵系统导热与直接传热联合干燥循环。一部分二次蒸汽压缩后升温升压通过导热方式给物料传热,剩余蒸汽与新蒸汽混合后与物料直接接触传热,通过确定分流比例以达到最佳操作状态。采用压缩式热泵间接回收干燥器废气热的方法,首先将干燥器中的冷凝水闪蒸,并用蒸发物料产生的废气加热剩余冷凝水成蒸汽,将二者产生的蒸汽混合后压缩,再同生蒸汽混合返回干燥物料。该方法可节省大约 65%~70%的饱和蒸汽。

2.5 MVR 热泵技术在海水淡化中的应用

在水资源紧缺日益的今天,海水淡化成为缓解淡水问题的重要途径。截至 2005 年,全球海水淡化的总生产量^[17]达到。通常海水淡化包括多级闪蒸、多效蒸发和压汽蒸馏(MVC)^[18]。MVC 蒸馏方法是将二次蒸汽加压后用于蒸发器加热自身冷凝成为

淡水。一般规模不大,适用于中小型日产百吨级、千吨级淡水净化项目。2003 年,我国首台 60m³/d 的 MVC 海水淡化装置成功投产运行^[19]。

朱天松等^[20]针对产能 15 万 t/a 离子膜烧碱装置使用卤水取代原盐的 MVR 蒸发浓缩工艺进行了研究,运行结果表明,采用 MVR 全卤制碱工艺,在不计入冷凝水回收利用(48 万 m³/a),光减少二次盐水加热蒸汽(1.2 万 t/a)每年就能节约原料及运行成本约 2 200 万元。同时还节省了真空制盐生产中卤水→真空固体盐,氯碱公司再化盐(液-固-液)的大量能量消耗,据估算 15 万 t/a 离子膜烧碱 MVR 全卤制碱工艺节能减排约 2 万标煤/年,节能效果明显。

焦东升^[21]用热力学第二定律分析了 MVR 海水淡化实验系统的有效能(火用)效率。实验数据表明 MVR 海水淡化系统的有效能效率为 2.8%,其中预热器,水泵,蒸发-冷凝器和压缩机的有效能损失分别占 10.2%,16.9%,34.6%和 35.5%。通过实验数据发现,MVR 系统在海水淡化过程中虽然回收了余热,具有较高的热效率,但是整个系统的有效能效率却还是比较低,针对各个环节还有很大的改进空间。

2.6 MVR 热泵技术在蒸馏领域中的应用

蒸馏过程是属于高能耗的单元过程,多年来,各种精馏节能方法被提出并得到很好的应用,就多效精馏而言^[22-23],虽然大大的提高了二次蒸汽利用率,但首效蒸馏塔的仍然需要消耗大量的新鲜蒸汽,且末效蒸馏塔二次蒸汽的热量回收较为困难。为进一步降低能耗,将 MVR 热泵技术与精馏过程相结合的方法被提出并得到了深入研究^[24]。

近年来,热泵精馏技术的研究主要是针对一些近沸、小温差体系的分离,由于这些体系的分离需要消耗更多的热量。陆恩锡等^[25-26]以实际工业装置丙烯精馏塔为例,对釜液节流式热泵流程进行详细的计算机模拟,同常规无热泵蒸馏塔相比,实际热泵流程可以节省操作费用达 48%。徐忠等^[27]以 3 种不同的流程对丙烯精馏塔进行模拟计算对比后指出,3 类热泵能耗大小依次是:闭式>釜液节流式>塔顶气相压缩式。塔顶气相压缩式性能最优,值得在工业应用中优先考虑。

热泵精馏过程的能耗主要取决于压缩机的功耗,而压缩机的功耗又与压缩比紧密相关,通常单级压缩机的压缩比不可能很大(一般在 1.5~2.0 之

间),因此在处理大温差体系的蒸馏过程中,为满足必要的工艺条件,往往需要采用多级压缩,即多级MVR热泵精馏,类似于多效精馏过程。杨德明等^[28]针对稀DMF水溶液的蒸馏,提出了多级MVR热泵蒸馏工艺,认为三级MVR热泵蒸馏工艺最为合适,与常规的三效蒸馏工艺相比,其能耗可节约约83.2%,同时提高了过程的热力学效率。同样,杨德明等^[29]以处理回收稀DMAC水溶液为研究对象,将MVR热泵技术用于该体系的蒸馏过程,研究结果表明,采用三级串联压缩、中间分流的MVR三塔精馏工艺其综合经济效益最佳,与常规单塔蒸馏工艺相比,综合能耗降低90.3%左右。

国内目前针对热泵精馏的工艺研究较多,但实际应用依然很少,关键在于实用的蒸汽压缩机技术一直以来受国外技术封锁,而国内研究起步又比较晚。可喜的是,目前已有国内企业生产并投入实际应用的蒸汽压缩机,笔者与蒸汽压缩机生产商合作,成功开发了一套具有完全自主产权的MVR热泵蒸馏装置,用于DMF废液的回收。为MVR热泵技术应用于蒸馏过程提供理论基础和实际应用参考。

3 MVR 精馏案例

为进一步阐述MVR热泵技术的节能效果,笔者以仲丁醇-异丁醇小温差体系作为研究对象,在规定的进料条件和分离要求的基础上,对该体系的常规精馏、双效精馏、塔顶汽相压缩热泵精馏以及塔底液闪蒸压缩热泵精馏4种工艺进行了模拟与优化。计算得到了各种工艺中冷凝器、再沸器热负荷以及压缩机功耗等参数,由此计算出各种工艺的能耗数据,结果见表1。图2为塔顶汽相压缩热泵精馏工艺流程,图3为塔底液闪蒸压缩热泵精馏工艺流程。

表 1 不同工艺的能耗比较

精馏工艺	能耗/kW	节能/%
常规精馏	3 334	—
双效精馏	2 579	22.6
塔顶蒸汽直接压缩热泵精馏	372	88.8
塔底液相闪蒸压缩热泵精馏	368	88.9

由表1可明显看出,对于类似仲丁醇-异丁醇小温差体系,采用常规精馏因需要较高的回流比,必然能耗很高。而双效精馏虽然是利用高压塔顶蒸汽给低压塔底供热,然而由于高压塔塔底仍需大量蒸汽,因而节能效果不是很明显。而MVR热泵精馏工

艺,由于充分回收了塔顶蒸汽潜热及塔底物料显热,因此只需压缩机消耗少部分电耗即能满足分离要求,节能优势非常明显。2种MVR热泵精馏工艺的节能效果相当。

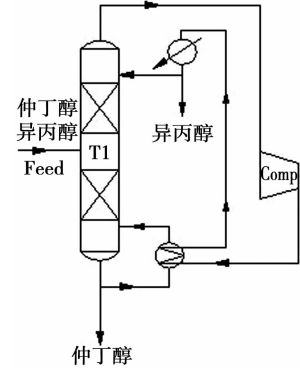


图 2 塔顶蒸汽直接压缩供热工艺流程
Fig. 2 Scheme of tower top vapor recompressed heat pump distillation

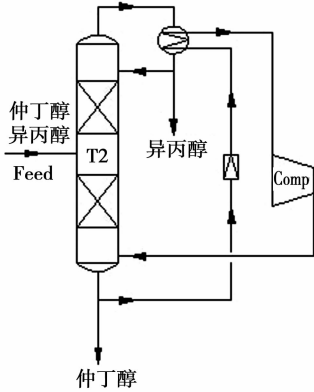


图 3 塔底液相闪蒸压缩供热工艺流程
Fig. 3 Scheme of tower bottom liquid flash recompressed heat pump distillation

4 应关注的几个问题

- 1)压缩比的选择。压缩机的功耗和传热温差均随压缩比的增大而增大,虽然能耗增加了,但由于传热温差的增大,换热器的面积随之减小,因而设备投资费用下降。因此存在一个经济压缩比的问题。顾承真等^[30]通过分析传热温差和压缩比对COP的影响,认为压缩比宜控制在2~3之间、有效温差在5~8℃时较为合理。因此压缩比的选择应根据不同的工艺要求,通过调节操作压力和蒸发面积等以获得较为经济的工艺路线。
- 2)压缩机类型的选择。目前投入使用的蒸汽压缩机主要有离心式、罗茨式和螺杆式3种,就综合经济效益而言,压汽量小但要求高压压缩比的适合宜采用罗茨式蒸汽压缩机和螺杆式蒸汽压缩机,而压汽

量大但压缩比要求不高的适合宜采用离心式蒸汽压缩机。在压汽量非常大的场合,可以考虑数台离心式蒸汽压缩机的并联;而在高压压缩比的场合,可以考虑数台罗茨式蒸汽压缩机的串联,从而可解决单台压缩机不能满足工艺要求的问题。

3)另外,在实际应用中,该技术还面临着压缩机动力设备的选型、系统背压的控制、以及压缩机运行中出现的过流等诸多问题^[31]。

5 结 论

机械蒸汽再压缩热泵技术作为一项先进的节能工艺,除了以上介绍的应用外,在废水处理、食品加工、垃圾渗滤液处理等行业都有着相关应用,其巨大的节能优势堪称节能领域技术进步的里程碑。再者,其成功的应用实例预示着 MVR 热泵技术必将在各个过程工业中凸显出其优势地位。

参考文献:

- [1]常至勇. 浅谈机械蒸汽再压缩制盐技术在钙型卤水中的应用[J]. 化工设计, 2012(5):15-16.
- [2]李如虎. 应用热泵节能技术充分利用低温余热[J]. 广西电力技术, 1999(2):53-56.
- [3]Keith Alesander, Brian Donohue. Failure analysis of an MVR (mechanical vapor recompressor) Impeller[J]. Engineering Failure Analysis, 2010 (17):1345-1358.
- [4]庞卫科, 杨鲁伟, 张振涛, 等. 提高蒸发过程热经济性的措施分析[C]//2011 年中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议论文集. 北京:中国工程热物理学会, 2012.
- [5]Nafeya A S, Fathb E S, Mabrouk A A. The design of an multi-effect evaporation mechanical vapor compression (MEE-MVC) desalination process[J]. Desalination, 2008, 23(1-3):1-15.
- [6]Juwayhel F, Dessouky H. Analysis of single effect evaporator desalination systems obtained with vapor compression heat pumps[J]. Desalination, 1997, 14(3):253-275.
- [7]徐敏, 马勇. MVR 和 ME 技术在中盐金坛生产运行中的能耗比较[J]. 中国井矿盐, 2011, 42(6):12-13.
- [8]黄成. 机械压缩式热泵制盐工艺简述[J]. 盐业与化工, 2010, 39(4):42-44.
- [9]李树生, 吴宗生. 滩田饱和卤水机械式蒸汽再压缩蒸发工艺研究[J]. 盐业与化工, 2009, 38(1):18-20.
- [10]Zehr S. Process energy efficiency improvement in Wisconsin cheese plants[D]. New York: University of Wisconsin-Madison,

1997.

- [11]Galitsky C, Worrell E, Ruth M. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the Cornwet Milling Industry[J]. Desalination, 2003, 12(3):34-45.
- [12]董守亮, 李庆生. MVR 技术在液态奶蒸发系统中的应用[J]. 轻工机械, 2014, 32(4):1-4.
- [13]LIU Xiao-li, Gu Zhao-lin, LIU Zong-kuan, et al. New technology of black liquid concentration by vapor compressor heating liquid[J]. Energy Conservation Technology, 2003, 21(5):27-31.
- [14]刘俊杰. 热泵在造纸工业节能减排中的应用[J]. 天津造纸, 2011(3):22-25.
- [15]应广东, 陈克复, 刘泽华. 化机浆废水零排放项目[J]. 中华纸业, 2012(5):45-48.
- [16]戴群特, 杨鲁伟, 张振涛, 等. 蒸汽再压缩热泵系统用于固体干燥节能分析[J]. 节能技术, 2011(4):353-356.
- [17]茅龚丹, 肖颖. 海水淡化技术现状与发展[J]. 机械制造, 2013(6):91-92.
- [18]解利昕, 李凭力, 王世昌. 海水淡化技术现状及各种淡化方法评述[J]. 化工进展, 2003(10):1081-1084.
- [19]杨家臣, 陈素宁, 王宁, 等. 海水淡化工艺及发展趋势[J]. 广州化工, 2012(20):46-48.
- [20]朱天松, 樊春升. 机械蒸汽再压缩(MVR)技术在淡盐水浓缩中的应用[J]. 苏盐科技, 2013(4):12-14.
- [21]焦冬生. 机械蒸汽蒸馏海水淡化系统的可用能分析[J]. 太阳能学报, 2008(10):1197-1203.
- [22]Hilde K Engelen, Sigurd Skogestad. Multi-effect distillation applied to an industrial case study[J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(8):819-826.
- [23]Rakes Agrawal. Multieffect distillation for thermally coupled configurations[J]. AIChE Journal, 2003, 46(11):2211-2224.
- [24]侯涛. 基于机械蒸汽再压缩热泵的 DMAC 水溶液浓缩工艺模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2013, 25(3):50-52.
- [25]陆恩锡, 吴震. 蒸馏过程热泵节能-热泵基本原理[J]. 化学工程, 2008, 36(8):75-78.
- [26]陆恩锡, 罗明辉. 蒸馏过程热泵节能-热泵系统模拟计算[J]. 化学工程, 2008, 36(9):75-78.
- [27]徐忠, 陆恩锡, 罗明辉. 热泵节能-三种类型热泵的比较[J]. 化学工程, 2008, 36(10):75-78.
- [28]杨德明, 陶磊, 叶梦飞, 等. MVR 热泵精馏处理回收稀 DMAC 水溶液[J]. 节能技术, 2013, 31(181):409-412.
- [29]杨德明, 陶磊. 基于多级蒸汽机械再压缩热泵的稀 DMF 水溶液蒸馏浓缩工艺[J]. 石油化工, 2012, 41(11):1298-1301.
- [30]顾承真, 颜旭, 张志强, 等. 机械蒸汽再压缩蒸发系统的性能研究进展[J]. 食品与机械, 2013(5):12-16.
- [31]钱伯章. 蒸汽再压缩蒸发器提高乙醇生产蒸汽利用率[J]. 化工装备技术, 2012(3):57-59.

(责任编辑:殷丽莉)