

机械蒸汽再压缩技术(MVR)研究现状

李伟¹,朱曼利²,洪厚胜^{1,3*}

(1. 南京工业大学生物与制药工程学院,江苏南京211816; 2. 南京工业大学化学与分子工程学院,江苏南京211816; 3. 南京汇科生物工程设备有限公司,江苏南京210009)

摘要:介绍了蒸发装置的不同类型,重点对机械蒸汽再压缩技术在国内的研究进展进行了综述,并与其他蒸发技术进行了对比。随着研究的不断推进,机械蒸汽再压缩技术会得到大力推广。

关键词:机械蒸汽再压缩技术;蒸发;研究现状;节能

中图分类号:TQ051.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)11-0028-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.11.007

Research status of mechanical vapor recompression technology (MVR)

LI Wei¹, ZHU Man-li², HONG Hou-sheng^{1,3*}

(1. College of Life Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. College of Chemistry and Molecular Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

3. Nanjing Huike Bioengineering Equipment Corporation, Nanjing 210009, China)

Abstract: Different types of evaporation device are introduced. The research progress of mechanical vapor recompression technology in China is highlighted and compared with other evaporation techniques. The mechanical vapor recompression technology will be widely applied in the future with the progress of related researches.

Key words: MVR; evaporation; research status; energy conservation

随着工业的快速发展,我国现如今面临着巨大的能源危机,成为制约一些企业发展的主要障碍。与此同时,人们环保意识的淡薄,以及多年粗放式发展模式,环境也面临着严重的威胁,于是,国家大力倡导节能减排,大力推进节能环保型产业的发展,并将节能环保作为中国的基本国策之一^[1]。

蒸发属于化工过程中基本的操作单元,其目的是使含有不挥发溶质的溶液沸腾气化并移除蒸汽,从而使溶液中溶质浓度提高。蒸发操作广泛应用于化工、医药、食品等工业中^[2-3]。同时,蒸发作为分离过程中耗能较大的单元操作,如何减少蒸发的能耗和采用新技术是发展节能环保产业的重要部分。

蒸发既可分批蒸发,也可连续蒸发,既可在加压、常压下进行,也可在减压下进行。减压下的蒸发称为真空蒸发,溶液在低于常压的工况下不仅降低了原料液的蒸发温度,有效地提高传热温度差,而且降低了对系统相关设备以及管道的材质要求,同时又能保证蒸发过程的连续而稳定^[3-4]。

1 蒸发装置的类型及特点

蒸发装置分为多种类型:单效蒸发(SE)、多效蒸发(ME)、多级闪蒸(MSF)、热力蒸汽再压缩技术

(TVR)、机械蒸汽再压缩技术(MVR)^[4],下面就对不同的类型做简单的介绍。

1.1 单效蒸发(SE)

单效蒸发是最基本的蒸发过程,来自锅炉的蒸汽使原料液在蒸发器内加热沸腾,产生的二次蒸汽不再进行处理,直接进行冷凝,使二次蒸汽中蕴含的潜能造成极大的浪费。

1.2 多效蒸发(ME)

蒸发过程必然会带来二次蒸汽的产生,如何有效地利用二次蒸汽的能量成为亟待解决的问题,多效蒸发则有效地减少了新鲜蒸汽的消耗量,多效蒸发是将多个蒸发器连接在一起,前一效产生的二次蒸汽可作为下一效的加热源,只有末效产生的二次蒸汽才会冷凝下来^[2-3],这样就极大地减少了新鲜蒸汽的消耗量以及冷却水的消耗量。但随着效数的增加,设备的投资越来越大,节省的蒸汽却越来越少,因此,综合来看,多效蒸发一般做到5~7效有较好的经济效益^[5-6]。

1.3 多级闪蒸(MSF)

多级闪蒸是指将原料液经过预热器加热到一定温度后,进入多个温度、压力逐级降低的多级闪蒸器,在闪蒸器内的压力控制在低于预热后原料液温

收稿日期:2016-02-29

基金项目:国家高技术研究进展(863)重点项目(2012AA021201)

作者简介:李伟(1992-),男,硕士生;洪厚胜(1965-),男,教授,研究方向为生化工程及生化反应设备,通讯联系人,025-58139380, hhs@njtech.edu.cn。

度所对应的饱和蒸汽压,于是,原料液在进入闪蒸器后会急速地部分气化,从而达到分离提纯的目的。多效蒸发中各级凝液逐级闪发节能措施可视为多级闪蒸的一种。多级闪蒸不像多效蒸发有温差的限制,相邻两级可以设计比较小的温差,在给定的条件下,可以设计成更多的级数,而使得供热量很低。多级闪蒸较多效蒸发防垢性能好,且可循环利用废热和低品位热能^[3-6]。目前,多级闪蒸技术主要应用在海水淡化工业中。并取得了较好的经济效益。

1.4 热力蒸汽再压缩技术(TVR)

热力蒸汽再压缩技术属于热泵技术的一种,蒸发过程产生的二次蒸汽由于其能量的损耗,不能直接作为自身的热源,只能作为次效或次几效的热源。如作为本效热源必须给予额外能量,增加蒸汽的温度和压力,提高热焓值。而热力蒸汽再压缩技术采用蒸汽喷射压缩器即可达到要求。蒸发沸腾后得到的低品位的二次蒸汽一部分在高压工作蒸汽的带动下进入喷射器混合,使得温度和压力升高后,重新进入蒸发器的加热室当作加热蒸汽使用,来加热料液。剩余的二次蒸汽则会进入冷凝器进行冷凝,从而达到节能的目的。从效能上来讲,相当于增加了一效蒸发器^[2-10]。因此节能效果可达到60%左右,但蒸汽喷射压缩器只能压缩一部分二次蒸汽,还是会造成能量的损耗。且用来引射的工作蒸汽需要很高的压力,因此在应用中还是有一定的局限性。

1.5 机械蒸汽再压缩技术(MVR)

机械蒸汽再压缩技术作为新时代的蒸发技术,在蒸发界已引起越来越多的关注。该技术是在1917年由瑞士 Sulzer-EscherWyss Ltd 发明的,并在1925年安装了世界上第一台 MVR 设备^[7]。在国

外,早在20世纪50—60年代,MVR技术已广泛应用在蒸发工业中,但国内对MVR的研究起步较晚,直到20世纪80年代,随着国内对蒸汽压缩机的研究不断成型,MVR技术的节能效果才重新被国人重视。

机械蒸汽再压缩技术的工作原理是:原料液经预热进入蒸发器中,蒸发沸腾产生二次蒸汽,经过分离器进行分离提纯后,进入蒸汽压缩机,使得二次蒸汽的温度、压力、热焓值得到大幅度的提升,得到的高品位的二次蒸汽可以重新进入蒸发器内替代新鲜蒸汽进行换热,于是除了启动该系统时,需要通入一点蒸汽外,只要产生二次蒸汽,就可关闭新鲜蒸汽的加入,完全利用了二次蒸汽的全部能量^[6-13]。

机械蒸汽再压缩技术的主要设备有预热器、蒸发器、蒸汽压缩机、气液分离器。在该系统中,预热器主要选用结构简单的板式换热器,可以用二次蒸汽冷凝下来的余热和蒸发得到的浓缩液的余热来对原料液进行预热,也可以进行电加热。对蒸发器的研究,目前在该系统中应用最多的蒸发器是降膜蒸发器,最近的研究中,水平管降膜蒸发器凭借着高传热效率、设备体积小等优点已经越来越受到青睐,该系统中研究重点主要在蒸汽压缩机上,压缩机的作用是将低品位的二次蒸汽经过加压后得到高品位的蒸汽,所以蒸发压缩机工作效率的高低直接影响MVR系统的节能效果,目前国内的压缩机主要还是依赖于进口,根据蒸发量的不同需要,在MVR系统上应用最多的是离心式压缩机和罗茨式压缩机,离心式压缩机主要应用在蒸发量较大的蒸发系统中,当所需蒸发量较小时,则需选用罗茨式压缩机。气液分离器的作用是净化气相,使纯化后的二次蒸汽

(上接第27页)

[19] Chen Wen, Luo Zhongyang, Yang Yi, *et al.* Upgrading of bio-oil in supercritical ethanol; Using furfural and acetic acid as model compounds[J]. *Bioresour*, 2013, 8(3): 3934 - 3952.

[20] Li Wang, Pan Chunyan, Zhang Qijun, *et al.* Upgrading of low-boiling fraction of bio-oil in supercritical methanol and reaction network [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(7): 4884 - 4889.

[21] Chen Wen, Luo Zhongyang, Yu Chunjiang, *et al.* Upgrading of bio-oil in supercritical ethanol; Catalysts screening, solvent recovery and catalyst stability study[J]. *J Supercrit Fluid*, 2014, 95: 387 - 393.

[22] 崔洪友, 马成亮, 李志合, 等. 生物油中反应性化合物对羧酸在超临界甲醇中酯化的影响[J]. *燃料化学学报*, 2011, 39(5): 347 - 354.

[23] Xu Xingmin, Zhang Changsen, Zhai Yunpu, *et al.* Upgrading of bio-

oil using supercritical 1-butanol over a Ru/C heterogeneous catalyst: role of the solvent [J]. *Energy Fuels*, 2014, 28(4): 4611 - 4621.

[24] 魏巍, 陈平, 楼辉, 等. HZSM-5 催化剂上超临界乙醇中生物油催化提质及检测方法研究[J]. *浙江大学学报: 理学版*, 2012, 39(1): 67 - 70.

[25] Shinyoung O, Hyewon H, Hang S C, *et al.* The effects of noble metal catalysts on the bio-oil quality during the hydrodeoxygenative upgrading process [J]. *Fuel*, 2015, 153: 535 - 543.

[26] Peng Jun, Chen Ping, Lou Hui, *et al.* Catalytic upgrading of bio-oil by HZSM-5 in sub- and super-critical ethanol [J]. *Bioresour Technol*, 2009, 100(13): 3415 - 3418.

[27] Tang Zhe, Lu Qiang, Zhang Ying, *et al.* One step bio-oil upgrading through hydrotreatment, esterification, and cracking [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2009, 48: 6923 - 6929. ■

进入蒸汽压缩机,并且能收集浓缩液,一般在工业上适合 MVR 系统的气液分离器主要是悬液分离器和重力沉降分离器^[4-13]。

机械蒸汽再压缩的优点。

(1)节能效果明显,运行成本低。利用了二次蒸汽的潜热,设备一经启动,则不再需要新鲜蒸汽,只是需要一部分电能,使能耗大大降低。

(2)MVR 蒸发系统的公用工程配套少,设备投资小。该系统中省去了蒸汽冷凝装置,大大减少了冷凝水的用量。并且,相对于多效蒸发,MVR 系统只有 1 个蒸发器,占地面积小。

(3)不属于压力容器范畴,省去了使用压力容器的申报、检验程序。

(4)运行稳定,自动化程度高。该系统中的设备参数都可通过操作平台进行电脑调控。

(5)蒸发温度低,适合热敏性物料的加热浓缩。

2 MVR 的应用现状

机械蒸汽再压缩技术(MVR)在国内发展迅速,现已应用到各个领域内,包括海水淡化、废水处理、中药浓缩、固体干燥等。

2.1 MVR 在海水淡化中的应用

中国海水资源比较丰富,但淡水资源相对缺乏,因此如何从海水中得到淡水成为一项亟需解决的任务。目前,国内海水淡化的方法主要有反渗透、多级闪蒸和低温多效蒸发^[14-15]。但将机械蒸汽再压缩系统应用到海水淡化中相关的报道较少,焦东升^[16-17]利用热力学第二定律分析了机械蒸汽再压缩海水淡化实验系统的焓效率,实验结果表明,该技术的焓效率仍然较低。将 MVR 技术应用到海水淡化中的重点是选用高性能、低压缩比的压缩机,经济且耐腐蚀的换热管和适当的蒸发温度。并且建立了一套机械再压缩海水淡化系统,其设计生产能力为 2 m³/d,结果表明,蒸发温度在 89 ~ 97℃ 系统运行良好,并且淡水的产率提高约 7.2%。刘鹏等^[18]介绍了将 MVR 技术与多效蒸发结合进行海水淡化的工艺,并通过性能对比,得出了 MEE-MVR 相结合技术不仅充分回收了余热,节能效果显著,并具有较高的热效率。但有待改进的地方还有很多。

2.2 MVR 在废水处理中的应用

随着工业的快速发展,各个行业产生废水的量也急剧增加,包括含盐废水、发酵废液、化机浆废液、高浓度氨氮废水、垃圾填埋渗滤液等。因此,在废水处理中,亟需一种高效、节能、低成本的处理方法,

MVR 凭借其自身的优点,在废水处理行业已经得到大力推广,并取得了好的效益。袁金龙等^[19]将 MVR 技术应用到化机浆废液的处理中,以南方某造纸厂 15 万 t/a 化机浆项目为例,介绍 MVR 技术在化机浆废液预浓缩处理中的应用,并对工艺流程以及运行能耗进行了分析。实验结果说明,与相同规模的多效蒸发站相比,采用 MVR 技术每年运行成本会减少 2 177 万元,工艺设备上增加的投资预计在 1 年左右即可收回。区藏器等^[20]结合 MVR 的原理特点,对处理垃圾填埋渗滤液中的可行性进行了分析,提出了一套合理的 MVR 配套工艺,并对设备进行了合理的选型。除此之外,MVR 技术也可以与精馏技术相结合,利用更节能、有效的组合技术,得到更好的效益。申涛等^[21]将 MVR 技术与传统的汽提法脱氨结合在一起进行高氨氮废水的处理,并与传统的多效蒸发与汽提法脱氨技术相结合的技术进行了对比,结果表明,采用 MVR 汽提脱氨技术要比传统的多效汽提脱氨技术的操作成本节省了一半以上。杨德明等^[22]采用 MVR 热泵精馏技术从稀 DMAC 水溶液中回收 DMAC,并提出了 3 种 MVR 热泵精馏技术方案,即三级 MVR 单塔精馏工艺、MVR-常规两塔精馏工艺以及三级 MVR 三塔精馏工艺。结果表明,与常规的单塔精馏工艺相比,三级 MVR 三塔精馏工艺最节能,节能效果可达 90.3%。对于高浓度含盐废水或含重金属的污水处理中,为防止 MVR 技术在应用过程中受到限制,龚全知等^[23]自主开发了一种新型高分子材料的换热膜可替代金属材料的 MVR 系统,并将新材料的 MVR 与传统材料的 MVR 进行了成产能耗成本对比,结果显示,同等效数下,新型 MVR 要比传统 MVR 节约生产成本 22.3%。

2.3 MVR 在中药浓缩中的应用

中药浓缩是中药加工工序中重要的一环,蒸发浓缩工序的浓缩效果影响着药品质量,近几年有关部门也在纷纷开发有价值的中药浓缩新技术。将 MVR 技术引入到中药浓缩中,可以大大地降低能耗,并且 MVR 适合热敏性物料的蒸发浓缩,对中草药的适应性很强。王国振等^[24]证明了在中药浓缩中对中药提取液也有一定的要求,并探索了几种常见的中药的黏度进行了测定,指出将 MVR 技术应用到中药浓缩中,选择合适的温度才是关键。刘旭海等^[25]在中药浓缩方面,将传统的浓缩技术与 MVR 技术进行了能耗的对比,得出 MVR 技术节约成本,减小蒸汽的消耗量,减少除尘费用。并以

2 t/h 的 MVR 浓缩器与传统的双效浓缩器进行了能耗测算对比, MVR 蒸发器每年节省费用为 148.2 万元, 经济效益相当可观。王谷洪等^[26]设计了一种强制循环工艺的 MVR 蒸发器, 并具体阐述了该工艺流程, 并将 MVR 蒸发器工艺与传统的三效蒸发器的运行成本进行了计算对比, 结果显示, MVR 蒸发器每年可节省 304 万元, 同时也有效解决了在中药浓缩过程中易结垢的问题。因此 MVR 蒸发技术在中药浓缩方面的应用具有广泛的前景。

2.4 MVR 在固体干燥中的应用

MVR 技术主要应用在蒸发领域, 目前在固体干燥中的报道相对较少, 干燥过程的实质是通过加热蒸发的方式, 除去固体中的水分, 固体为被干燥的物料, 工业中主要是用过热蒸汽或烟道气对固体进行干燥, 耗能较大, 产生的大量水蒸汽中蕴含着很大的潜能, 如何利用这些潜能成为节能的关键。因此, 将 MVR 技术应用到固体干燥中有巨大的经济效益和发展前景。戴群特等^[27]通过对不同的传热温差下的 COP 值的分析, 证明了 MVR 具有良好的节能效果, 并将 MVR 技术应用到固体干燥中, 设计了 MVR 热泵干燥机内蒸汽导热传热、接触对流传热以及 2 种传热联合干燥的循环实验系统, 与其他传统的干燥系统相比, MVR 干燥试验系统具有更好的节能效果, 并能得到高品质的产品。

3 结论

机械蒸汽再压缩技术(MVR)作为新型的蒸发技术, 完全利用了二次蒸汽的潜热, 提高了热效率, 大大降低了生蒸汽的消耗量, 其经济性相当于多效蒸发的 30 效。其凭借节能效果好、运行成本低等诸多优点已逐渐替代传统的蒸发技术, 应用到各个领域, 应用前景十分广阔^[28]。

参考文献

- [1] 何睦盈, 蔡宇凌, 胥娟. 机械蒸汽再压缩(MVR)技术的发展及应用[J]. 广东化工, 2013, 40(17): 115-116.
- [2] 姚玉英, 黄凤廉, 陈常贵, 等. 化工原理(上册)[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2012: 290-298.
- [3] 时钧, 汪家鼎, 余国宗, 等. 化学工程手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 1996: 765-780.
- [4] 张国臣, 李荣杰. 蒸汽压缩机(热泵)工艺应用[J]. 盐业与化工, 2015, 44(2): 13-17.
- [5] 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.
- [6] 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): 12-14.
- [7] 赵媛媛, 赵磊, 钱方, 等. 机械蒸汽再压缩(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.
- [8] Alexander K, Donohue B, Feese T, et al. Failure analysis of an MVR (mechanical vapor recompressor) Impeller[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(6): 1345-1358.
- [9] Aly N H, El-Figi A K. Mechanical vapor compression desalination systems — A case study [J]. Desalination, 2003, 158 (1/2/3): 143-150.
- [10] 张永生, 黄超, 宋金虎. MVR 在板式蒸发装置中的应用[J]. 明胶科学与技术, 2011, (4): 194-198.
- [11] Marcovecchio M, Aguirre P, Scenna N, et al. Global optimal design of mechanical vapor compression (MVC) desalination process[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2010, 28 (10): 1261-1266.
- [12] Dale M C, Okos M R, Nelson P. Concentration of tomato products: Analysis of energy saving process alternatives[J]. Journal of Food Science, 1982, 47(6): 1853-1858.
- [13] Ettouney H. Design of single-effect mechanical vapor compression [J]. Desalination, 2006, 190(1/2/3): 1-15.
- [14] 田晓亮, 曲源, 孙晖. 热泵节能技术在海水淡化中的应用[C]//2006年石油和化工行业节能技术研讨会会议论文集, 2006: 448-451.
- [15] Liang L, Han D, Ma R, et al. Treatment of high-concentration wastewater using double-effect mechanical vapor recompression [J]. Desalination, 2013, 314(4): 139-146.
- [16] 焦冬生. 机械压汽蒸馏海水淡化系统的可用能分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(10): 1197-1203.
- [17] 焦冬生, 王军. 机械压汽蒸馏海水淡化系统的性能分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(1): 76-82.
- [18] 刘鹏, 王永青. 机械压汽蒸馏海水淡化技术的研究和发展状况[J]. 机电技术, 2011, 34(4): 161-165.
- [19] 袁金龙, 梁斌, 李文龙, 等. MVR 技术在化机浆废液处理中的应用[J]. 中国造纸, 2015, 34(7): 37-40.
- [20] 区藏器, 李穗中. MVR 处理垃圾填埋渗滤液的合理途径[J]. 广州环境科学, 2011(1): 17-19.
- [21] 申涛, 赵旭. 机械蒸汽再压缩技术在高氨氮废水处理中的应用[J]. 化工机械, 2013, 40(6): 816-818.
- [22] 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(5): 409-412.
- [23] 龚全知, 邓湘军. 一种新型节能机械蒸汽再压缩装置[J]. 电子世界, 2014(18): 298-298.
- [24] 王国振, 赵海栋, 张丽琴, 等. MVR 蒸发器应用与中药提取液相关物理特性研究(一种节能型中药浓缩技术)[J]. 中国医学装备, 2014, (B12): 133-134.
- [25] 刘旭海, 王谷洪. 突破性的中药浓缩节能新技术探析[J]. 现代制造, 2013(14): 22-25.
- [26] 王谷洪, 郭亮, 周齐. 浅析 MVR 浓缩技术在中药方面的应用[J]. 现代制造, 2015, (35): 22-24.
- [27] 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, 29(4): 353-356.
- [28] Kiss A A. Distillation technology—still young and full of breakthrough opportunities[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2014, 89(4): 479-498. ■