

机械蒸汽再压缩系统的设计及其在食品工业中的应用

Design and application in food industry of mechanical vapor recompression system

李伟¹ 朱曼利² 洪厚胜^{1,3}

LI Wei¹ ZHU Man-li² HONG Hou-sheng^{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)

(1. College of Life Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 2. College of Chemistry and Molecular Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 3. Nanjing Huike Bioengineering Equipment Corporation, Nanjing, Jiangsu 210009, China)

摘要:从热力学的角度对 MVR 系统进行了分析,并主要对蒸发器、蒸汽压缩机、预热器进行数学模型的构建。综述 MVR 技术在国内外食品工业上的应用。

关键词:机械蒸汽再压缩;热力学;数学模型;热泵

Abstract: From the point of view of thermodynamics, the mechanical vapor recompression (MVR) system was analyzed, and the mathematical model of evaporator, steam compressor and pre-heater was built. The application of MVR technology in food industry was reviewed from the domestic and foreign research progress of the technology.

Keywords: mechanical vapor recompression; thermodynamics; mathematical model; heat pump

蒸发过程作为工业过程中基本的单元操作,广泛应用于化工、食品、医药、海水淡化等各个领域,蒸发同精馏过程一样,都属于化工单元操作中耗能最多的过程,在蒸发操作中,一方面消耗大量的生蒸汽,一方面又产生大量的含能较高的冷凝水和二次蒸汽,所以蒸发操作的节能与废热利用是不可忽视的经济问题^{[1]290-292[2]}。

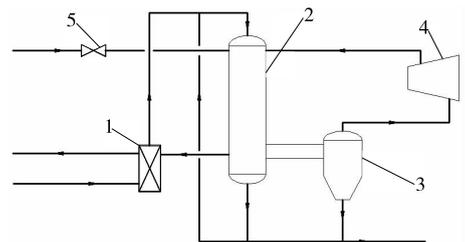
机械蒸汽再压缩技术(MVR)起源于国外。早在 20 世纪 50~60 年代,国外早已掌握了这门技术,并大量的投入到工业生产中,取得了很好的经济效益。但中国起步较晚,目前对该系统的研究还不是很成型,目前大型的蒸汽压缩机还依赖于进口。近年来,中国政府考虑到能源价格问题以及遵循可持续发展的理念,先后在 2007 年和 2010 年将 MVR 技

术列为国家大力鼓励和支持发展的节能环保设备^[3]。现在 MVR 技术在中国已呈现蓬勃发展的局面。

1 MVR 系统的流程及原理

MVR 热泵系统的原理流程见图 1。其基本流程是原料液经过预热后,进入到蒸发器中进行换热蒸发,产生低温低压低焓值的二次蒸汽,进入分离器进行分离提纯后,上端产生的二次蒸汽进入到蒸汽压缩机中,下端产生的浓缩液一部分进入到浓缩罐中,一部分作为循环重新进入到蒸发器中,经压缩机压缩后的二次蒸汽温度、压力升高,变为高品位的二次蒸汽,经过喷水处理消除一定的过热度后,重新进入蒸发器的加热室内作为热源对料液进行加热^[4-8],此时,可以切断新鲜蒸汽的供应。蒸汽换热后产生的冷凝水和得到的浓缩液仍然有较高的温度,可以作为热源对物料进行预热,这样,整个 MVR 系统就完全利用了产生的余热。节能效果明显,经济效益可观。

蒸汽的热力学状态变化见图 2。图 2 中 A(a)点是预热后达到饱和的原料液状态;B(b)点是饱和的原料液进入到蒸发器中换热沸腾产生的饱和蒸汽的状态;该过程中原料液由饱和液体受热沸腾变为饱和液体状态,温度不变,焓值增大,



1. 预热器 2. 降膜蒸发器 3. 汽液分离器 4. 蒸汽压缩机 5. 调节阀

图 1 MVR 热泵的工艺流程

Figure 1 Operating principle of the heat pump

基金项目:国家高技术研究进展(863)重点项目(编号:2012AA021201)

作者简介:李伟,男,南京工业大学在读硕士研究生。

通讯作者:洪厚胜(1965—),男,南京工业大学教授,博士。

E-mail: hhs@njtech.edu.cn

收稿日期:2016-03-30

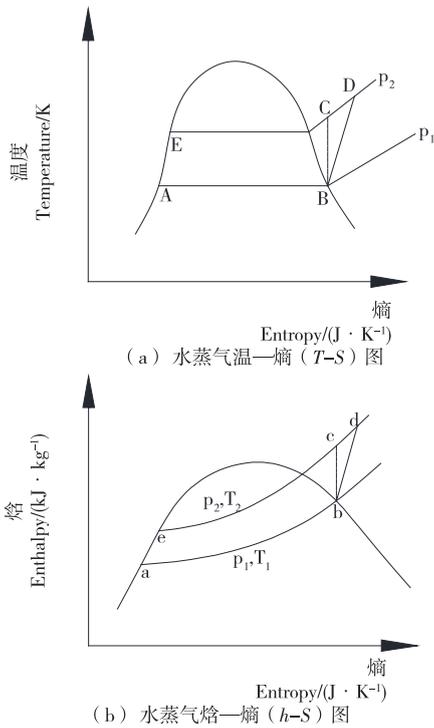


图2 水蒸气热力学图

Figure 2 The chart of steam thermodynamic

焓值增大。C(c)点是压缩机在理想状态(等熵绝热压缩)下经二次蒸汽压缩后得到的高品位蒸汽的状态,但在实际的压缩过程是不可逆过程而且系统不是完全绝热的,所以经过压缩后的二次蒸汽会变为具有更高过热度的D(d)点的状态,此时需要先经过喷水对过热蒸汽进行饱和和处理,然后再进入蒸发器的加热室进行冷凝放热,E(e)点即为得到的饱和蒸汽冷凝液状态^[9-11]。

由图2可知,从饱和原料液的蒸发到二次蒸汽的压缩再到高品位的二次蒸汽冷凝放热均会有焓值的变化。MVR系统能够运行,达到节能的目的,实质就是:利用压缩机做少量的功来提高二次蒸汽的热焓,使得温度提高,进而利用压缩后蒸汽的大量潜热重新加热原料^[12-14]。

2 MVR 蒸发系统的设计

MVR 蒸发系统内存在显著的能量变化主要集中在蒸发器、蒸汽压缩机和预热器3个主要的单元结构中。对于实际运行中的物料蒸发,可以从质量传递和热量传递上分析,从而得出各个设备的设计参数。

2.1 蒸发器

蒸发器有的用直接热源加热,也有的用间接热源加热,对于MVR蒸发系统来讲,应用最多的是降膜蒸发器,降膜蒸发器具有物料停留时间短,适合热敏性物料的蒸发;薄膜状蒸发,传热系数较大;同时压降小,设备内滞液量少等优点^[15-16]。物料沿着蒸发器的管壁流动时,由进料状态的单向流变成气液两相流,液体的流动状态也变化很大。而且,随着料液的蒸发,溶液的物理性质和热敏性等特征均发生变化。为了简化系统的分析,对蒸发过程作了如下理论假设^[17]:

- ① 忽略溶液浓度变化对沸点的影响;
- ② 溶液的比热容不受温度等参数的影响,为恒定值;
- ③ 蒸汽中不含有物料;
- ④ 系统换热过程无热损。

由假定条件,存在的质量和物料平衡关系^[6,18-19]见式(1)和式(2):

$$q_f = q_d + q_b, \quad (1)$$

$$q_f x_f = q_b x_b, \quad (2)$$

式中:

- q_f —— 原料液的进料量, kg/h;
- q_d —— 产生二次蒸汽的量, kg/h;
- q_b —— 浓缩液的量, kg/h;
- x_f —— 原料液中溶质的质量分数, %;
- x_b —— 浓缩液中溶质的质量分数, %。

忽略了热损失,蒸发过程吸收的热量在理论上与蒸汽的冷凝释放热相同,具体热量平衡关系^[20]见式(3),其中冷热流体的传热温差是由系统的设计参数和压缩机性能决定的。

$$q_e h_{v1} = q_f C_{pc} (t - t_{c2}) + q_d h_{v2}, \quad (3)$$

式中:

- q_e —— 加热蒸汽的消耗量, kg/h;
- h_{v1} —— 加热蒸汽的焓值, kJ/kg;
- C_{pc} —— 原料液的比热容, kJ/(kg·°C);
- t —— 原料液的饱和温度, °C;
- t_{c2} —— 原料液的预定温度, °C;
- h_{v2} —— 二次蒸汽的焓值, kJ/kg。

由换热量和传热面积的关系可得到式(4):

$$Q_{ex} = K_i A_i \Delta t, \quad (4)$$

式中:

- Q_{ex} —— 蒸发器的总换热量, kJ/h;
- K_i —— 蒸发器的总传热系数, W/(m²·°C);
- A_i —— 蒸发器的换热面积, m²;
- Δt —— 平均温度差, °C。

在蒸发器中,换热器的间壁两侧流体均有相变化时,饱和蒸汽和沸腾液体间的传热就是恒温传热,此时,冷热流体的温度均不沿管长变化,流体的流动方向对 Δt 两者间温度差处处相等,即平均温度差 Δt 为冷热流体的温度差值。

总传热系数 K_i 由设备结构、操作条件和物性等多种因素决定的,设计时需要先根据经验总结值算出所需传热面积,再根据具体情况选用合适的安全系数予以校正,一般降膜蒸发器的总传热系数为1 200~3 500 W/(m²·°C)^{[1]309}。

2.2 蒸汽压缩机

MVR 技术得以成熟应用的基础就是蒸汽压缩机的设计。目前在MVR系统中应用最多的压缩机当属离心式压缩机和罗茨式压缩机。压缩机具有热泵的功能,将低温、低压、低品位的饱和二次蒸汽压缩,变成高温、高压、高品位的蒸汽后,经过在压缩机的进口或出口处喷入定量的水以消除蒸汽的过热度,重新进入蒸汽冷凝腔内放热。以罗茨式蒸汽压缩机为例进行分析,压缩后气体处于过热状态,过热温度可由式(5)^[21-23]求得:

$$\frac{T_d}{T_s} = \left(1 + \frac{k-1}{k} \frac{\epsilon-1}{\eta_v}\right) - \tau, \quad (5)$$

式中:

T_d —— 过热蒸汽的温度, K;

T_s —— 蒸发压强下的饱和蒸汽温度, K;

k —— 绝热指数;

ϵ —— 罗茨压缩机的压缩比;

η_v —— 容积效率, %;

τ —— 因散热产生的温度偏差, K。

罗茨式蒸汽压缩机在压缩过程属于多变压缩过程, 其消耗的功率可由式(6)^[24] 而得。

$$W_i = \frac{k}{k-1} q_{vs} p_s \left[\left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right], \quad (6)$$

式中:

W_i —— 压缩机的理论功率, kW;

q_{vs} —— 进气体积流量, m³/h

P_d —— 压缩机的排气压强, kPa;

P_s —— 压缩机的吸气压强, kPa;

q_0 —— 压缩蒸汽的流量, kg/h;

m —— 多变指数。

多变指数 m , 表示实际气体多变压缩过程中状态参数变化的指数, 其值可由式(7)^[24] 求出。

$$\frac{T'_d}{T_s} = \left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{\frac{m-1}{m}}, \quad (7)$$

式中:

T'_d —— 不考虑散热的理论排气温度, K。

取 $T'_d = T_d + \tau$, 若取压缩机的机械效率为 η_m , 电动机效率为 η_v , 则电动机的总消耗功率 W_e 为:

$$W_e = \frac{W_i}{\eta_m \eta_v}. \quad (8)$$

为消除压缩过后的二次蒸汽的过热度, 需要补充定量的水, 根据能量守恒的原则, 可得补充水的质量流量 q_w 。

$$q_w h_w + q_d h_d = (q_w + q_d) h_{as}, \quad (9)$$

式中:

q_w —— 补充水的量, kg/h;

h_w —— 补充水的焓值, kJ/kg;

h_d —— 过热二次蒸汽的焓值, kJ/kg;

h_{as} —— 饱和二次蒸汽的焓值, kJ/kg。

2.3 预热器

原料液进入蒸发器之前温度需要预热到饱和温度, 预热器的功能是利用浓缩液显热、高温冷凝水显热和热蒸汽的潜热来预热原料, 使得溶液达到预定温度 t_{c2} , 预热设备通常选用板式换热器。因预热的热源不同, 每个换热体系都有单独的热量交换, 总传热量 Q_p 可由式(10)所求,

$$Q_p = q_f C_{pc} (t_{c2} - t_{c1}) = q_d C_{pd} (T_{d1} - T_{d0}) + q_b C_{pb} (T_{b1} - T_{b0}) + q_z r, \quad (10)$$

式中:

t_{c1} —— 原料液的初始温度, °C;

C_{pd} —— 冷凝水的比热容, kJ/(kg·°C);

T_{d0} —— 冷凝水的初始温度, °C;

T_{d1} —— 冷凝水预热后的终温, °C;

C_{pb} —— 浓缩液的比热容, kJ/(kg·°C);

T_{b1} —— 浓缩液的初温, °C;

T_{b0} —— 浓缩液预热后的终温, °C;

q_z —— 新鲜蒸汽用来预热的量, kg/h;

r —— 新鲜蒸汽的焓值, kJ/kg。

换热量的计算公式(11)可得出换热面积, 在不考虑污垢热阻以及热损失带来的影响时, 板式换热器的总传热系数 K 可由公式(12)计算,

$$Q_p = KA \Delta T_m, \quad (11)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}, \quad (12)$$

式中:

K —— 预热器总传热系数, W/(m²·°C);

A —— 预热器的换热面积, m²;

ΔT_m —— 平均温差, °C;

α_i —— 原料液的对流传热系数, W/(m²·°C);

α_o —— 蒸汽的对流传热系数, W/(m²·°C);

b —— 管壁的厚度, m;

λ —— 管壁材料的导热系数, W/(m·°C)。

通过式(1)~(12)可计算出 MVR 系统在稳定运行时的状态, 在确定了系统的蒸发温度和二次蒸汽的压缩比后, 在设计要求下的蒸发量时, 便可得到系统的换热量, 以及压缩机的功率。最后可根据浓缩液和冷凝水的分流量不同分别选择不同面积的预热器, 并根据设计预热温度的不同, 适当增加一定量的新鲜蒸汽预热以达到设计要求。

3 MVR 在食品工业的研究进展

随着对 MVR 技术研究的不断深入, MVR 技术已经应用到了各个领域, 其中包括: 食品工业、制碱工业、化学工业、造纸工业^[25] 等。随着 MVR 在食品工业的应用, 大大促进了食品工业的发展, 降低了成本, 减少了能耗, 取得了很好的效益^[26-28]。

在食品领域的蒸发浓缩中, 食品中成分大部分属于热敏性物料, 为保证食品的质量, 减少高温对食品中营养成分的破坏, 需在低温下进行操作^[26], MVR 技术可以实现这一要求, 并达到很好的节能效果。早在 1978 年, 国外就将 MVR 技术应用到了乳制品的浓缩过程, Dale 等^[29] 将 MVR 技术应用到番茄酱的生产工艺中来浓缩番茄汁, 并与其的 5 种浓缩方式进行了对比, 得出: MVR 产生的经济效益最高。Grattieri 等^[30] 介绍了 MVR 在意大利食品工业中的应用, 其中包括: 乳品的浓缩、果蔬汁的浓缩等, 并且将现有的单效 MVR 蒸发器与传统的三效蒸发器进行了成本的对比, 得出: MVR 蒸发器的能耗减小了将近 1/3。Dietrich^[31] 将 MVR 技术应用到糖果厂, 并阐述了 MVR 降膜蒸发器的操控方式。促进了 MVR 技术在国外的应用。

在中国, 将 MVR 应用到食品的浓缩过程中起步较晚, 但现如今, MVR 技术也已经应用在了乳制品、蔬菜、果汁等浓缩过程^[32-33]。董守亮等^[34] 设计了一套基于 MVR 技术的蒸发工艺流程, 并对系统的各个部分进行了设计计算, 采用

了焓分析模型进行了影响系统性能参数的分析,提出:为达到较高的性能,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。秦人伟^[35]则介绍了MVR技术在浓缩果蔬汁生产中的应用,并以蒸发浓缩1 t料液为例,对传统的四效蒸发和MVR蒸发进行能耗上的对比,得到采用MVR技术可节省标煤80%以上,指出MVR技术节能潜力很大。

4 结语

机械蒸汽再压缩系统(MVR)属于热泵技术,理想状态下,符合逆向卡诺循环的热力学定律,在热泵循环过程中,重新利用系统的预热,大大节省了燃料。虽然MVR技术在中国起步较晚,系统运行还不完善。但随着中国对MVR发展的重视,以及MVR技术凭借其节能,投资少,规模小,运行平稳等众多优点,应用到食品工业领域,符合中国的发展,有巨大的发展潜力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 时钧,汪家鼎,余国琮,等. 化学工程手册[M]. 3版. 北京:化学工业出版社,1996:765-780.
- [3] HAN Dong. Study on zero-emission desalination system based on mechanical vapor recompression technology [J]. Energy Procedia, 2015, 75: 1 436-1 444.
- [4] 顾承真,洪厚胜,颜旭,等. 罗茨压缩机驱动MVR热泵系统的节点分析[J]. 现代化工,2014,34(4):125-129.
- [5] ZHANG Lin, MA Zhi-lei, XU Chen. The research and development of mechanical vapor recompression evaporation energy-saving system [J]. Journal of Veterinary Medical Science, 2012, 63(63): 1-4.
- [6] 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): 1 261-1 266.
- [7] ZHOU Ya-su, SHI Cheng-jun, DONG Guo-qiang. Analysis of a mechanical vapor recompression wastewater distillation system [J]. Desalination, 2014, 353: 91-97.
- [8] NAFEY A S, FATH H E S, MABROUK A A. Thermo-economic design of a multi-effect evaporation mechanical vapor compression (MEE-MVC) desalination process[J]. Desalination, 2008, 230(s 1/3): 1-15.
- [9] 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.
- [10] SHEN Jiu-bing, XING Zi-wen, WANG Xiao-lin, et al. Analysis of a single-effect mechanical vapor compression desalination system using water injected twin screw compressors[J]. Desalination, 2014, 333(1): 146-153.
- [11] LIANG Lin, HAN Dong, MA Ran, et al. Treatment of high-concentration wastewater using double-effect mechanical vapor recompression[J]. Desalination, 2013, 314(4):139-146.
- [12] 陈新志,蔡振云,胡望明,等. 化工热力学[M]. 3版. 北京:化学工业出版社,2013:145-160.
- [13] 余国琮,郁永章,冯霄,等. 化工机械工程手册:上卷,第4篇[M]. 北京:化学工业出版社,2003:29-45.
- [14] 余国琮,郁永章,张早校,等. 化工机械工程手册:中卷,第28篇[M]. 北京:化学工业出版社,2003:10-11.
- [15] 张涛俊,黄建,钟建新,等. 降膜蒸发器的研究[J]. 石化技术,2015,22(8):19-20.
- [16] 杜帅,孙文哲,苏子云. 立式降膜蒸发器的机理研究[J]. 制冷空调与电力机械,2010,31(5):20-23.
- [17] 刘德亮. 机械蒸汽再压缩蒸发结晶系统性能研究[D]. 浙江:浙江工业大学,2013:31-41.
- [18] LE C N, KIM G, ANDIKA R, et al. Application of mechanical vapor recompression to acetone-methanol separation[J]. International Journal of Chemical Engineering & Applications, 2014, 5(3): 215-218.
- [19] Ettouney H. Design of single-effect mechanical vapor compression[J]. Desalination, 2006, 190(1/3): 1-15.
- [20] 倪思梅,周亚素,石成君,等. 机械蒸汽再压缩系统的设计与分析[J]. 上海节能,2013(3):39-42.
- [21] 苏春模. 罗茨鼓风机及其使用[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1999:66-75.
- [22] YANG Jun-ling, ZHANG Chong, ZHNAG Zhen-tao, et al. Study on mechanical vapor recompression system with wet compression single screw compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 205-211.
- [23] 赵博. 水蒸气再压缩热泵系统的性能分析[D]. 北京:北京工业大学,2012:16-19.
- [24] 刘立,张继军,刘燕,等. 机械蒸汽再压缩式热泵用于降膜蒸发系统的研究[J]. 现代化工,2014,34(9):128-132.
- [25] PANG Wei-ke, YANG Lu-wei, ZHANG Zhen-tao. Theoretical and experimental study on the falling-film evaporator applied to mechanical vapor compression [J]. Advanced Materials Research, 2013, 753: 2 667-2 674.
- [26] 蔡正云,何建国,周翔. 热泵技术在食品工业中的应用及研究开发[J]. 食品研究与开发,2007,28(5):157-161.
- [27] 刘殿宇. 蒸发器蒸发温度过高对奶粉质量的影响[J]. 乳业科学与技术,2009,32(6):285-286.
- [28] 刘殿宇,陈丽. 单效降膜式蒸发器在液态奶生产中的设计研究[J]. 乳业科学与技术,2010,33(4):167-168.
- [29] 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): 1 853-1 858.
- [30] GRATTIERI W, MEDICH C, VANZAN R. Electrotechnologies for energy end uses: application of mechanical vapor recompression to food industry[C]// International Conference & Exhibition on Electricity Distribution. London: Institution of Electrical Engineers, 2001: 4.38-5.38.
- [31] DIETRICH D. Enhanced digital control of a mechanical recompression evaporator in a modern fructose refinery[J]. Starch-Stärke, 1985, 37(5): 149-155.
- [32] 恽世昌. MVR乳品降膜蒸发器[J]. 中国乳品工业,2013,41(6):31-34.
- [33] 金世琳. 带有机再压缩(MVR)的蒸发器[J]. 食品与机械,1990(2):25-28.
- [34] 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.
- [35] 秦人伟. 节能热泵技术在浓缩果蔬汁生产中的应用[J]. 饮料工业,2012,15(12):31-33.