

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.04.001

MVR 技术在液态奶蒸发系统中的应用

董守亮, 李庆生

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

摘 要: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,介绍了 MVR 热泵系统的蒸发工作原理;采用单效 MVR 热泵蒸发系统,对系统主要工作部件进行了设计计算;采用焓分析模型对系统及各个部件进行了能效分析;并对影响系统性能的主要参数:压缩比、蒸发温度进行了分析。应用结果表明该系统具有运行稳定、能耗低等特点;焓分析结果指出了系统在用能方面的薄弱环节及改进系统性能的方向;参数分析表明,当压缩比增大时系统的性能系数 η 和焓效率减小,而当蒸发温度升高时呈相反的变化趋势,因此,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。

关 键 词:奶制品加工;液态奶浓缩;机械蒸气再压缩(MVR);焓分析;系统性能系数

中图分类号:TS252.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)04-0001-04

Application of Mechanical Vapor Recompression Technology in Liquid Milk Evaporation System

DONG Shouliang, LI Qingsheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: Concentrating on the high energy consumption and low thermal efficiency in evaporation of liquid milk, the MVR evaporation concentration craft was proposed. The evaporation process based on MVR technology was designed and the evaporation working principle of MVR heat pump system was introduced. Main working parts of system were calculated and designed by using single effect MVR heat pump evaporation system. Analysis of energy efficiency of system and each part was carried on by exergy analysis method. Main parameters that affected the performance of the system such as the compression ratio, evaporation temperature were also analyzed. The application results show that the system has stable operation and low energy consumption. The results of the exergy analysis point out the weak links of the system in energy consumption and the improvement of performances of the system. The parameters analysis shows that the system coefficient of performance and exergy efficiency decreases with compression ratio increasing and increases with evaporation temperature rising. Therefore, the dairy MVR evaporation system should adopt compressors of small compression ratio and keep a high evaporation temperature.

Key words: dairy products processing; liquid milk evaporation; mechanical vapor recompression(MVR); exergy analysis; coefficient of system performance

蒸发浓缩是乳品工业中耗能较大的一个环节,一般采用多效蒸发工艺,这在效数增加的同时也增大了设备投资费用,系统的综合经济性并没有明显改善。机械蒸气再压缩(MVR)蒸发技术作为一种高效环保的节能技术,与传统的多效蒸发相比,由于不需要额外蒸气,可以降低单位产品成本,提高经济效益,因此在

蒸发、浓缩等领域有着广泛应用^[1]。

MVR 蒸发系统中二次蒸气通过压缩机压缩后升温、升压提高热焓,并将压缩后的二次蒸气循环利用替代新鲜蒸气作为热源,从而减少能源消耗。同时,由于取消了循环冷却水,降低了冷却水消耗量和高维护成本^[2]。目前对该系统的研究方法多为“能量分析法”,

收稿日期:2014-03-08;修回日期:2014-04-25

作者简介:董守亮(1986),男,青海西宁人,硕士生,主要研究方向为 MVR 热泵蒸发技术。E-mail:dsl1986596@163.com

该方法主要从能量的数量上进行分析,未考虑能量质的差异性,有时达不到判断整个系统节能薄弱环节的目的,因此本文采用焓分析方法对系统进行分析。

1 系统工艺原理

本文设计一套采用 MVR 技术处理能力为 5 t/h 的液态奶蒸发浓缩系统,系统工艺流程如图 1 所示。系统主要参数如下:蒸发温度 58 ℃,蒸发量 2 750 kg/h,蒸发面积 140 m²。

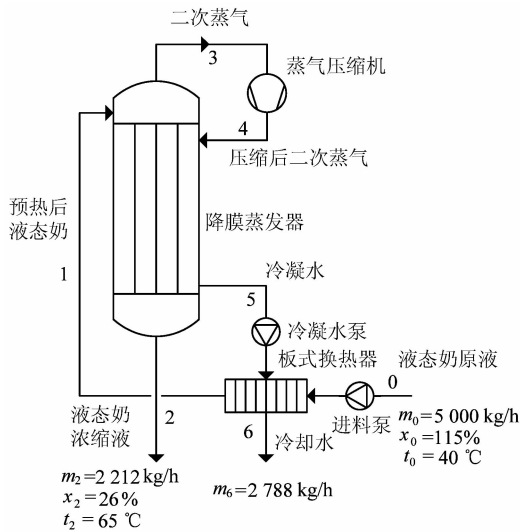


图 1 MVR 液态奶蒸发浓缩系统流程图

Figure 1 Flow diagram of milk concentrate system with MVR

系统的具体工艺流程为:原料液 0 经板式换热器与从蒸发器出来的冷凝水 5 预热后进入蒸发器;预热后原料液 1 在降膜蒸发器管内受热蒸发,蒸发后的浓缩液 2 排出蒸发器外;而蒸发出来的二次蒸气 3 则经除沫后进入蒸气压缩机,升温升压提高热焓后的二次蒸气 4 进入蒸发器壳程,与原料液换热冷凝放热后,排出蒸发器并在板式换热器中预热原料液后排出系统为冷却水 6。

2 系统主要部件选型计算

压缩机是 MVR 蒸发装置中的核心部件,压缩机的选择主要是根据需求压缩的蒸气量、二次蒸气温度和二次蒸气需要提高的温度。离心风机具有的小压比、大流量特点可以将其应用于溶液处理量较大的蒸发工艺场合^[3]。MVR 乳品蒸发器主要采用高压离心风机或带齿轮箱的单级离心压缩机。MVR 系统的小温差特点决定了应采用传热效率较高的蒸发装置,才能体现节能效果,降膜式蒸发器是比较合适的一种;同时对于牛奶等热敏性物料的浓缩,降膜式蒸发器有物

料停留时间短、可低温操作等优点^[4-5]。系统中各状态点的工艺参数见表 1。

表 1 MVR 蒸发系统各状态点工艺参数

Table 1 Parameters of milk concentrate system with MVR

项目	温度 t/℃	质量分数 x/%	蒸发量 m/ (kg · h ⁻¹)	汽相焓 h''/ (kJ · kg ⁻¹)	液相焓 h'/ (kJ · kg ⁻¹)	熵 s/ (kJ · K ⁻¹)
0	20.0	11.5	5 000		83.9	0.296 3
1	40.0	11.5	5 000		167.6	0.572 3
2	58.0	26.0	2 212		242.8	0.805 7
3	58.0		2 788	2 611.4	257.2	7.885 2
4	65.4		2 788	2 706.1	503.4	7.130 6
5	63.7		2 788		266.7	0.877 5
6	43.0		2 788		180.3	0.611 7

运用表 1 中数据,并根据物料平衡和能量平衡,可得出系统的蒸发水量为

$$D = F \left(1 - \frac{x_1}{x_2} \right) = 2\,788 \text{ kg/h} \quad (1)$$

由蒸发水量得到蒸气压缩机功率为

$$N = \frac{D}{3\,600} \cdot \frac{h''_4 - h''_3}{\eta_c} = 97.8 \text{ kW} \quad (2)$$

蒸气冷凝放出热量为

$$Q = D(h''_4 - h'_4) = 6.14 \times 10^6 \text{ kJ/h} \quad (3)$$

系统性能系数为

$$\eta = \frac{Q}{3\,600N} = 17.5 \quad (4)$$

蒸发浓缩在乳品工业中是耗能较大的一个环节,热效率比一般维持在 6:1 者,就是较为理想的了,普通则都低于 4:1^[6]。表 2 为 MVR 蒸发系统主要性能参数。从表中可知,本系统的 η 达到 17.5,说明系统的热性能较好,能够达到较好的节能效果。

表 2 MVR 蒸发系统主要性能参数

Table 2 Main performance parameters of MVR evaporation system

蒸发量/ (kg · h ⁻¹)	蒸发 温度/℃	蒸发 面积/m ²	风机 功率/kW	压缩比	性能系数 η
2 788	58	138.6	97.8	1.4	17.5

3 蒸发系统的焓分析

3.1 系统焓模型^[7]

物流在动能和势能忽略不计焓可由下式计算

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

式中: $h/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$, $s/\text{kJ} \cdot (\text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ 分别为计算状态下的比焓和比熵; h_0, s_0 分别为环境基准状态下的比焓和比熵。

物流的物理焓为

$$e_{ph} = C_p(T - T_0) - T_0 \left[C_p \left(\ln \frac{T}{T_0} \right) - \frac{P - P_0}{T_0 \rho_m} \right] \quad (6)$$

式中: C_p 为溶液的比热容/ $\text{kJ} \cdot (\text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$; T_0/K , P_0/MPa 分别为环境基准状态下的温度和压力; ρ_m 为溶液的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

物流的化学焓为

$$e_{ch} = -NRT_0 [(x_w \ln x_w + x_s \ln x_s)] \quad (7)$$

式中: $\dot{N}$ 为溶液摩尔流率; R 为气体常数/ $[\text{kJ} \cdot (\text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})]$; x_w, x_s 分别为溶剂和溶质的质量分数。

结合式(7)和(8)可得物料的焓计算公式如下

$$E_b = M(e_{ph} + e_{ch}) \quad (8)$$

式中: E_b 为溶液的焓流率/ W 。

对所考虑的过程中每个单元的焓平衡方程为

$$E_F = E_P + E_D + E_L \quad (9)$$

式中: E_F 为供给焓,由焓源或起焓源作用的物质向体系提供的焓; E_P 为有效焓,体系将输入的原料加工为产品所消耗的焓; E_D 为系统不可逆造成的内部耗散焓; E_L 排放到外界的外部损失焓^[8]。

则焓效率为

$$\eta_{ex} = \frac{E_P}{E_F} \quad (10)$$

3.2 分析和讨论

表3 为系统的焓分析计算结果,根据表3 可知系统的焓效率为56.7%,表明系统仍存在较大的不可逆损失,为提高系统效率,应找出焓损失较大的设备并改进这些设备的性能。

由表3 可知降膜蒸发器与蒸汽压缩机的焓损较大,约占系统总焓损的52.6%和26.1%,为主要的焓损部位,因此系统性能改进潜力最大的环节是蒸发器,其次是压缩机。

压缩机和板式换热器的焓效率较低,因此改进压缩机和板式换热器是提高系统用能效益的重点。对于压缩机而言,焓损主要有两部分:一是电能转换为机械功部分;另一是将机械功转化为压能部分。减少压缩机的焓损应从这两方面着手。提高蒸发器的焓效率,可从两个方面考虑:一是减小散热损失,即提高蒸发器的热效率;二是减小蒸发器的内部焓损失,即由传热温差和流动阻力造成的焓损失。

4 参数变化对系统性能的影响

压缩比和蒸发温度是影响 MVR 系统性能的关键参数。图2 为系统性能系数 η 与压缩比的关系。由图可见,压缩比越大 η 越小。这是因为压缩比增大时压

表3 MVR 系统的焓分析结果

Table 3 Exergy analysis results of MVR system

单元设备	焓损失 E_D/kW	焓效率 $\eta_{ex}/\%$	焓损比率/ $\%$
降膜蒸发器	24.5	72.4	52.6
压缩机	12.1	64.5	26.1
板式换热器	7.5	58.7	16.2
泵等	2.4	78.3	5.1
总计	46.5	56.7	

缩功耗显著增大,而二次蒸气的换热量并没有明显变化,因此系统性能系数降低。图3 为系统焓效率与压缩比的关系。压缩比越大焓效率越小。因为压缩比增大使得二次蒸气温度升高、换热温差变大,这使蒸发器焓损失增大,而蒸发器焓损失在系统中占很大比重,因此系统焓效率减小。

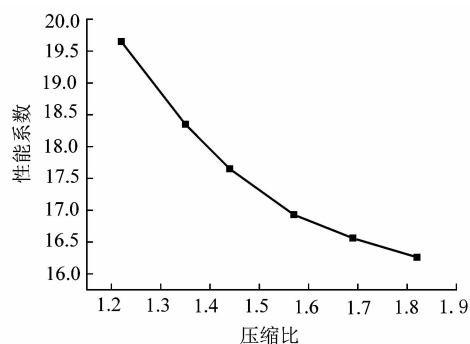


图2 性能系数与压缩比的关系

Figure 2 Impact of compression ratio on η

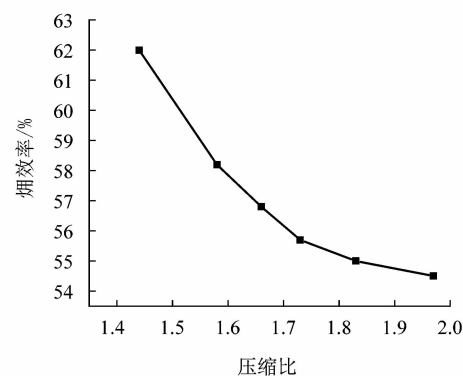


图3 焓效率与压缩比的关系

Figure 3 Impact of compression ratio on exergy efficiency

图4 为性能系数 η 与蒸发温度的关系。由图可知, η 随着蒸发温度的升高呈上升趋势,但上升幅度不大,且当蒸发温度超过 65°C 以后, η 的变化趋势明显趋缓,因此蒸发温度对性能系数的影响不大。图5 为系统焓效率与蒸发温度的关系。焓效率随着蒸发温度的升高而增大。因为高温使得系统的焓值增大、焓效

率升高。但考虑结垢、操作费用等因素,蒸发温度不宜过高。

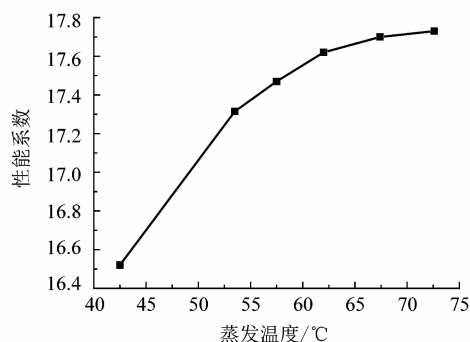


图 4 性能系数与蒸发温度的关系

Figure 4 Impact of evaporation temperature on η

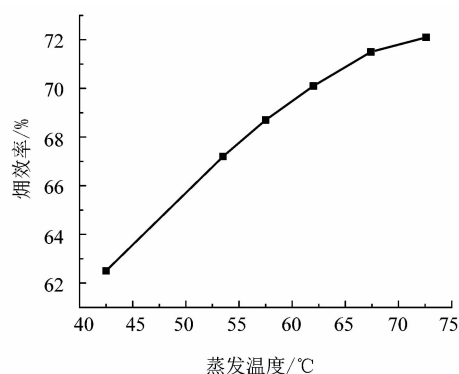


图 5 焓效率与蒸发温度的关系

Figure 5 Impact of evaporation temperature on exergy efficiency

5 结论

1) MVR 蒸发系统性能系数 η 为 17.5,说明系统有较好的节能效果。

2) 系统的焓分析表明,蒸发器和压缩机是整个系统中焓损失最大的部位,因此可通过改进设备性能进一步提高整个系统的热经济性、降低产品成本。

3) 压缩比和蒸发温度是影响系统性能的关键因素,用来反映系统能效状况的性能系数和焓效率随压缩比变化呈正比,而与蒸发温度呈反比。

参考文献:

- [1] 冯霄. 化工节能原理与技术[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2009:37-74.
- [2] 梁林, 韩东, 彭涛. 机械蒸气再压缩硫酸铵废水处理系统的焓分析[J]. 化学工程, 2012, 40(8): 74-78.
- [3] 庞卫科, 林文学, 潘麒麟, 等. 离心风机驱动机械蒸气再压缩热泵系统的性能分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 142-146.
- [4] 恽世昌. MVR 乳品降膜蒸发器[J]. 中国乳品工业, 2013, 41(6): 31-34.
- [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] 金世琳. 带有机机械再压缩(MVR)的蒸发器[J]. 食品与机械, 1990(2): 25-28.
- [7] NAFEYA A S, FATHB H E S, MABROUK A A. Thermoeconomic design of a multi-effect evaporation mechanical vapor compression (MEE-MVC) desalination process [J]. Desalination, 2008, 230(1-3): 1-15.
- [8] AL-JUWAYHEL F, EI-DESSOUKY H. Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps[J]. Desalination, 1997, 114(3): 253-275.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

轻工业杭州机电设计研究院总工程师杨旭荣获 “首届中国造纸蔡伦科技奖”

根据中国造纸学会文件《关于表彰首届中国造纸蔡伦奖的决定》(中纸学字[2014]第 19 号), 中国联合装备集团有限公司所属企业轻工业杭州机电设计研究院副院长兼总工程师杨旭荣获“首届中国造纸蔡伦科技奖”, 该奖项是我国制浆造纸科学技术领域最高级别的社会奖项, 旨在表彰在我国造纸行业科技创新和技术进步中做出突出贡献的科技工作者, 杨旭同志作为全国 3 名获奖者之一, 既是对杨旭同志本人多年来对行业科技进步作出的贡献的褒奖, 也是对轻工业杭州机电院在行业里的技术领先地位的肯定。

杨旭同志 1985 年毕业于华南理工大学造纸工程及机械专业, 硕士学位, 30 年来一直工作在第一线, 取得了一大批科技成果, 如高速造纸机, 大型版纸机, 高速卫生纸机, 多层成型特种纸机的率先成功开发等等, 在行业内产生了较大的影响。在关键技术的开发方面也有不俗成绩, 如直通式上网成型器、无后座力摇振装置、压力成型器、三层成型斜网成型器, 新型膜转移施胶涂布器等, 取得发明专利多项。现担任中国造纸学会常务理事、华南理工大学造纸工程国家重点实验室学术委员会委员、制浆造纸国家工程实验室技术委员会副主任、全国轻工机械标准化技术委员会委员、国家科技奖励评审轻工组委员等职务, 是国务院政府特殊津贴专家、浙江省轻工厅和省直机关优秀共产党员, 并获得 2013 年度中央企业劳动模范称号。

杭州机电院科研团队成功研发的许多新技术、新装备, 为我国制浆造纸行业提高生产效率、节能减排、转型升级、淘汰落后产能提供了强大的支持。杨旭同志的获奖必将进一步激发杭州机电院制浆造纸科技工作者的聪明才智和创新精神, 增强荣誉感和使命感, 肩负使命, 攻坚克难, 为造纸科技进步和我国造纸工业的可持续发展做出新的更大贡献。

(徐 熙)