

酒精糟清液带热泵多效蒸发系统的优化研究

王培进 周作伸 吴文福 赵学笃
(山东工程学院) (吉林工业大学)

提 要 运用大系统优化理论“分解”、“协调”的思想,以酒精糟清液的蒸发浓缩为例,证明了“带喷射式热泵的多效蒸发若按等面积设计,在经济压缩比范围内无最佳解。”这一结论,对不等面积的寻优设计,给出了“分级决策求解法”和“两级平衡求解法”两种方法。

关键词 酒精糟 热泵 多效蒸发 优化

Study on the Optimization of Multiple-Effect Evaporators With the Thermal Vapour Recompression for the Clarified Spent Wash

Wang Pei-jin Zhou Zuo-shen Wu Wen-fu Zhao Xue-du
(Shandong Institute of Technology, Zibo) (Jilin University of Technology)

Abstract With the theory of large scale system optimization and on the case of the clarified spent wash, it is proved that according to the equal area design there is not the best solution on the multiple-effect evaporators with the steam-jet vapour recompression. Two kinds of methods to solve the optimization of unequal area design are pointed out.

Key words Spent wash Thermal vapour recompression Multiple-effect evaporators Optimization

1 引 言

清液的初始浓度仅为4.4%左右,对于处理15.48 t/h的清液量,浓缩至35%,要蒸发掉水分约13 t/h,可见其蒸发量之大,能耗之高。为降低能耗,节约鲜蒸汽耗量,应将带热泵蒸发和多效蒸发两种节能措施结合起来,设计带热泵的多效蒸发系统。这种蒸发工艺在国外已得到广泛应用^[1]。

综合考虑蒸汽来源,热泵特点^[2,3]最佳效数,物料流动性,物料初始温度,制造安装,国内酒精厂的实际情况等因素,我们提出了三效混流带蒸汽喷射式热泵多效蒸发系统,用于处理15.48 t/h清液的蒸发浓缩。其工艺流程如图1所示。

设计初始条件:

工作蒸汽压力: $P_0 = 10 \text{ bar}$ (1 bar = 100 kPa), $T_0 = 180$

第一效进口蒸汽压力: $P = 1.8 \text{ bar}$, $T = 116$

收稿日期: 1997-03-28

王培进, 博士生, 长春市人民大街142号 吉林工业大学博95级, 130025

未效二次蒸汽压力: $P_3 = 0.012 \text{ bar}$, $T_3 = 49$

物料初始流量: 15.48 t/h , 初始浓度:

4.4%, 最终浓度: 35%, 传热系数: $K_1 = 1800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $K_2 = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 $K_3 = 1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2 系统分析

对图1所示的蒸发系统的设计, 未见文献报道, 我们运用大系统优化理论^[4], 将上述系统分解为三个子系统, 局部优化和整体优化相结合, 进行了求解。

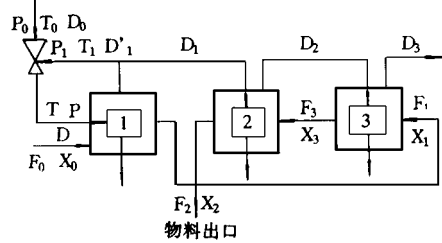


图1 三效带热泵工艺流程简图

2.1 热泵子系统

压缩比: $\epsilon = \frac{P}{P_1}$ 膨胀比: $\gamma = \frac{P_0}{P_1}$ 喷射系数: $\mu = \frac{D_1}{D_0}$

物料衡算: $D_1 = \mu \cdot D_0$ (1)

$D = D_1 + D_0 = (1 + \mu) \cdot D_0$ (2)

若已知 P_1 , 压缩比, 膨胀比, 喷射系数可确定。压缩比在如下范围内较为经济^[2]:

1.5 $\leq \epsilon \leq$ 2
 则: $0.96 \text{ bar} \leq P_1 \leq 1.2 \text{ bar}$
 $98 \leq T_1 \leq 104$

对应的喷射系数如表1所示。

表1 喷射系数与引射蒸汽压力之间的关系^[3]

$T_1/$	98	99	100	101	102	103	104
P_1/bar	0.9	1.0	1.013	1.02	1.1	1.15	1.2
γ	11	10	9.8	9.8	9	8.6	8.3
ϵ	2	1.8	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5
μ	0.4	0.75	0.8	0.8	0.85	0.9	1.0

2.2 第一效子系统

可列出四个方程:

物料平衡方程: $F_0 \cdot X_0 - [F_0 - (D_1 + D_0)] \cdot X_1 = 0$ (3)

热量平衡方程: $D \cdot r + F_0 \cdot h_0 - (D_1 + D_0) \cdot H_1 - [F_0 - (D_1 + D_0)] \cdot h_1 = 0$ (4)

传热速率方程: $D \cdot r - K_1 \cdot A_1 \cdot (T - t_1) = 0$ (5)

相平衡方程: $t_1 - T_1 - f(X_1) = 0$ (6)

2.3 二、三效子系统, 可以看作是相对独立的两效逆流蒸发系统

可列出七个独立方程:

$D_1 \cdot r_1 + (F_0 - D_1 - D_0 - D_3) \cdot h_3 - (W - D_1 - D_0 - D_3) \cdot H_2 - (F_0 - W) \cdot h_2 = 0$ (7)

$D_1 \cdot r_1 - K_2 \cdot A_2 \cdot (T_1 - t_2) = 0$ (8)

$t_2 - T_2 - f(X_2) = 0$ (9)

$F_0 \cdot X_0 - (F_0 - D_1 - D_0 - D_3) \cdot X_3 = 0$ (10)

$D_2 \cdot r_2 + (F_0 - D_1 - D_0) \cdot h_1 - D_3 \cdot H_3 - (F_0 - D_1 - D_0 - D_3) \cdot h_3 = 0$ (11)

$$D_2 \cdot r_2 - K_3 \cdot A_3 \cdot (T_2 - t_3) = 0 \tag{12}$$

$$t_3 - T_3 - f(X_3) = 0 \tag{13}$$

将式 (1)、(2) 代入上述各平衡方程, 可得11个独立方程, 但独立参量有14个。

式中 A ——加热面积, m^2 ; D_0 ——生蒸汽耗量, kg/s ; D_i ——蒸发量, kg/s ; F ——物料流量, kg/s ; H ——二次蒸汽焓值, J/kg ; h ——物料焓值, J/kg ; K ——总传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; r ——汽化潜热, J/kg ; t ——物料沸点, $^\circ C$; T ——蒸汽温度, $^\circ C$; X_i ——物料浓度, %。

3 求解分析

对上述蒸发系统的求解, 若按等面积设计, 独立变量为12个, 变量数仍多于方程的个数, 需选取决策变量。第一效二次蒸汽温度是十分关键的量, 它的选取既要满足热泵子系统的工作要求, 又要满足后面两个子系统的平衡要求, 具体体现在热泵子系统的喷射系数的确定上。给定一个 T_1 值, 由热泵子系统的工作要求可得一个喷射系数 (表1所示), 通过求解上述平衡方程, 也可得一个喷射系数, 二者应相等, 整个系统才能满足各平衡方程, 才有合理解。表2给出了以 T_1 作为决策变量时解平衡方程所得的喷射系数:

对比表1和表2可以看出, 二者无重合解。说明等面积设计, 由于各效蒸发量近似相等, 要使第一效的蒸发量既能满足喷射热泵子系统有较大的引射量 (对应较大的喷射系

表2 喷射系数的求解结果

$T_1/$	98	99	100	101	102	103	104
μ	0.34	0.239	0.140	0.045	0.047	0.134	0.218

数), 又能满足后两效子系统蒸发所需热量的要求, 显然是不可能的, 从而计算出现负值现象。因此, 带喷射式热泵的多效蒸发系统, 若按等面积设计, 在经济压缩比范围内无最佳解。这个结论是十分重要的。

4 不等面积优化求解

下面我们给出不等面积优化求解的两种方法, 分别称为“分级决策求解法”和“两级平衡求解法”。

4.1 分级决策求解法

不等面积求解, 需选定3个决策变量, 求最优解。

第一步: 在 T_1 给定的取值范围内, 选取一个值 T_{1i} , 由表1可得满足喷射热泵子系统要求的一个对应喷射系数 μ_i 。

第二步: 再选 T_2 为决策变量, 以年运行费为目标函数, 用优化程序求得一个最优解 F_i 。

第三步: 重复第一步和第二步, 得到一个最优解序列 $\{F_1, F_2, \dots, F_7\}$ 。

第四步: 从上述得出的最优解序列中再选取一个最优解, 即为系统的最优解。

4.2 两级平衡求解法

从热量平衡上看, 加大第一效蒸发量, 使其产生的二次蒸汽一部分满足后两效蒸发的需要, 另一部分满足喷射热泵引射蒸汽的需要。取 T_1 为104, 对应喷射系数为1, 引射量最大, 尽可能节约鲜蒸汽耗量, 但第一效传热温差减少, 要增大蒸发量, 势必增加第一效

的传热面积。因此, 取 $T_1 = 104$ 为定值, 喷射系数为1也一定, 选第一效蒸发量为决策变量, 若 $(D_1 + D_2)$ 已知, 则 $F_1 = F_0 - (D_1 + D_2)$; $X_1 = \frac{E_0 \cdot X_0}{F_1}$; $t_1 = T_1 + f(X_1)$ 。后两效构成的相对独立的子系统输入参量已知, 可按等面积设计求解, 求得其需要的加热蒸汽量 D_2 , 则: $D_2 = (D_1 + D_2) - D_1$; $D_0 = D_2$; $D = 2D_0$ 。检验第一效热量平衡方程是否满足给定的误差, 不满足修改第一效蒸发量; 若满足, 求取第一效加热面积, 结束计算。

表3给出了两种求解方法的计算结果比较。

表3 计算结果比较

比较	T_1	T_2	T_3	$(D_1 + D_2)$	D_2	D_3	A_1	A_2	A_3	$A_{总}$	鲜蒸汽量	年运行费用
第1种方法	104	0.70	0.49	0.7087	398.2870	9583576	029244	727.92	134.82	920.419	78.3937	218.15 万元
第2种方法	104	0.77	0.49	0.7087	4.2870	0813580	231223	245.88	239.88	239.399	7.3942	216.9 万元

对比两种算法, 第一种方法的最优解也对应着喷射系数为1的情况, 两种算法的计算结果基本接近, 第二种算法, 后两效采用等面积设计, 制造相对方便, 其年运行费用也较少, 计算过程也比第一种方法简炼, 故第二种方法优于第一种方法。

5 酒精糟清液蒸发浓缩工艺流程对比分析

表4对比分析了酒精糟清液蒸发浓缩四种最佳工艺流程, 第一种是四效混流管式强制循环蒸发工艺流程; 第二种是四效混流管式降膜—最终强制循环蒸发工艺流程; 第三种是四效混流板式降膜—最终强制循环蒸发工艺流程; 第四种是三效混流带喷射式热泵板式降膜—

表4 四种工艺流程对比

工艺流程	总面积 / m^2	蒸汽耗量 / $kg \cdot h^{-1}$	初始设备投资 /万元	年运行费 /万元
1	766.4	3946.2	300.4	242.6
2	595.6	3963.8	233.5	231.6
3	532.8	4008.3	208.9	229.4
4	399.7	3942.9	156.4	216.9

最终强制循环的蒸发工艺流程。从设备初始投资及年运行费用看; 第四种工艺流程最优。因此, 我们应大力提倡使用带热泵的多效蒸发系统。一台喷射式热泵的价格为2万元左右, 而节约的蒸汽费用却大大超过此数, 三效带热泵蒸发系统的蒸汽耗量, 相当于四效常规蒸发系统的蒸汽耗量, 经济效益十分明显, 尤其对清液这种高蒸发量的物料蒸发, 使用热泵蒸发, 就显得更有意义。

参 考 文 献

- 1 胡嗣明 酒精蒸馏废糟治理新技术及其利用途径 食品与发酵工业, 1986 (4): 43~ 46
- 2 王世军 利用喷射式热泵进行余热蒸汽的回收 节能, 1991 (3): 24~ 28
- 3 游向东 高效节能型蒸汽喷射压缩器软件 北京节能, 1995 (5): 40~ 43
- 4 朱道立 大系统优化理论与应用 上海交通大学出版社, 1987. 64~ 118