

# 烧碱蒸发装置炯分析 中炯效率的探讨

叶壁如 张夏平

(化工与生化工程系)

## 摘 要

本文根据炯\*效率的规律及基本要求,提出烧碱蒸发装置三个炯效率公式,同时比较并讨论了不同炯方程对炯效率公式的影响。

## 前 言

炯分析法自问世以来,在国内外已被许多耗能大的工业部门广为应用。其中以动力工程的炯分析经验尤为丰富,成果也较显著。在化工领域的应用方面,国外已有相当进展,而国内还仅限于少数化工产品的过程分析。如合成氨、炼油等。烧碱蒸发装置能耗颇大。为有效开展节能,国内已有几家开始对该装置进行炯分析法的探讨,本文拟就该装置炯分析中与装置的炯效率有关问题提出一些看法。

炯效率是炯分析的一项重要热力学指标。它不仅是过程或装置热力学完善性的量度,且对于应用炯分析结果进行工艺条件优选、工艺流程的评选及用能系统的优化设计等均具有重要的实际意义。然而在进行某一具体过程或装置的炯分析时,因定义炯效率公式在认识上的不同而得出不同的炯分析结果及炯效率值。本文认为任一过程或装置的正确炯效率公式必须符合炯效率规律及基本要求,并且必须以正确的炯衡算方程作为定义炯效率公式的依据。

## (一)

炯效率的普遍物理意义简单明确:

$$\text{炯效率} = \frac{\text{收益炯}}{\text{消耗炯}} = 1 - \frac{\text{总炯损}}{\text{消耗炯}}$$

然而在进行具体过程或装置炯分析时众多的炯衡算项目中那些该属于收益炯、那些该属于消耗炯往往众议不一而产生名目繁多的炯效率公式。欲判断其定义式正确与否本文认为西德的 H·D·Baehr 所提出的炯效率规律<sup>[1]</sup>及何耀文提及的炯效率基本要求<sup>[2]</sup>——即炯效率必须是一同类项、无因次比率且其定义式的分母项与分子项之差应为体系的总炯损——可作为

本文 1985 年 8 月 16 日收到。

• 包括以下所有“炯”字均“炯”的代用字。

判断的准则。作者曾考察 H·D·Baehr 所提出的普遍佣方程及其相应的普遍佣效率定义式, B·Linnhoff 所提出的二成分佣平衡模型及普遍佣方程相应的若干普遍佣效率定义式<sup>[3]</sup>, 杨东华所提出的三成分佣平衡模型及普遍佣方程相对应的所有普遍佣效率定义式<sup>[4]</sup>以及一些实际过程佣分析实例。它们的佣效率定义式均能符合上述的规律及要求, 因此本文认为: 佣效率定义式并非佣衡算方程中任意佣衡算项目的比率。只有符合上述判断准则的佣效率定义式, 可以考虑用为反映过程或装置的热力学完善性。对于那些分母项与分子项之差不等于体系总佣损的佣衡算项目比率式, 因它们只能反映装置或过程的某一性能, 故只能称为比率式而非佣效率定义式。作者曾对烧碱蒸发装置提出三个佣效率定义式, 其中的过程佣效率及装置佣效率是根据上述 B·Linnhoff 二成分佣平衡模型及其方程定义的, 该模型将进入和流出体系的佣流按其性质分为目的佣流  $E^+_{目}$ 、 $E^-_{目}$  及推动佣流  $E^+_{推}$ 、 $E^-_{推}$ 、其模型如图 1 所示;



图 1

依该模型可提出如下佣衡算方程:

$$E^+_{推} + E^+_{目} = E^-_{推} + E^-_{目} + E_{irr} \quad (1-a)$$

$$E^+_{推} - E^-_{推} = E^-_{目} - E^+_{目} + E_{irr} \quad (1-b)$$

$$E^+_{推} - E^-_{推} + E^+_{目} = E^-_{目} + E_{irr} \quad (1-c)$$

$$E^+_{推} = E^-_{推} + E^-_{目} - E^+_{目} + E_{irr} \quad (1-d)$$

式中  $E_{irr}$  称为总不可逆损失  $\Sigma D$ 。

联系烧碱蒸发装置的佣衡算实际、若将进入体系的碱佣  $E^+$  碱视为目的佣收入  $E^+_{目}$ ; 蒸发浓缩后出口碱佣  $E^-$  碱、分离盐带出物理佣  $E^-$  盐及出口二次汽佣  $E^-$  二次汽三项同视为目的佣支出  $E^-_{目}$ ; 将为各装置供热的生蒸汽佣或各装置的前效二次汽佣  $E^+$  汽、分离及循环碱液消耗的电能佣  $E^+$  电及析盐过程留给体系的结晶热佣  $E^+$  晶三项同视为推动佣收入  $E^+_{推}$ ; 并将离开装置的冷凝水佣  $E^-$  冷及碱浓缩所消耗的浓缩热佣  $E^-$  浓二项同视为推动佣支出  $E^-_{推}$ , 于是可依据该模型所对应的佣衡算方程定义出反映蒸发过程以及装置热力学完善性的如下四个佣效率定义式:

$$\begin{aligned} \eta_{B1} &= \frac{E^-_{推} + E^-_{目}}{E^+_{推} + E^+_{目}} = \frac{(E^-_{碱} + E^-_{盐} + E^-_{二次汽}) + (E^-_{冷} + E^-_{浓})}{E^+_{碱} + (E^+_{汽} + E^+_{电} + E^+_{晶})} \\ &= \frac{\Sigma E^-}{\Sigma E^+} = 1 - \frac{\Sigma D}{\Sigma E^+} \end{aligned} \quad (2-a)$$

$$\begin{aligned} \eta_{B2} &= \frac{E^-_{目} - E^+_{目}}{E^+_{推} - E^-_{推}} = \frac{(E^-_{碱} + E^-_{盐} + E^-_{二次汽}) - E^+_{碱}}{(E^+_{汽} + E^+_{晶} + E^+_{电}) - (E^-_{冷} + E^-_{浓})} \\ &= \frac{\Delta E_{目}}{\Delta E_{推}} \end{aligned} \quad (2-b)$$

$$\eta_{B3}' = \frac{E^-_{目}}{E^+_{推} - E^-_{推} + E^+_{目}} = \frac{E^-_{碱} + E^-_{盐} + E^-_{二次汽}}{(E^+_{汽} + E^+_{电} + E^+_{晶}) - (E^-_{冷} - E^-_{浓})} \quad (2-c)$$

$$\eta_{B4}' = \frac{E^-_{推} + E^-_{目} - E^+_{目}}{E^+_{推}} \\ = \frac{(E^-_{冷} + E^-_{浓}) + (E^-_{碱} + E^-_{盐} + E^-_{二次汽}) - E^+_{碱}}{E^+_{汽} + E^+_{电} + E^+_{晶}} \quad (2-d)$$

上式中的  $\eta_{B1}$  称为蒸发过程佣效率, 它可用以表示体系流出总佣与流入总佣之比。该效率可作为蒸发过程总佣利用率的度量,  $\eta_{B2}$  称为蒸发装置的佣效率, 它可用以表示蒸发装置为完成碱液蒸浓目的其净获得的目的佣收益与装置净消耗推动佣的比率, 它可反映装置内部的佣传递效率;  $\eta_{B3}$  与  $\eta_{B4}'$  二个佣效率定义式虽然也可反映装置的总佣利用率, 但其物理意义远不如  $\eta_{B1}$  及  $\eta_{B2}$  明确, 故作者只取  $\eta_{B1}$ 、 $\eta_{B2}$  用为蒸发装置的佣效率定义式。

为了反映蒸发过程消耗的最小理论功与过程总佣收入的比例关系, 作者还在文<sup>[5]</sup>提出目的佣效率  $\eta_{B3}$ :

$$\eta_{B3} = \frac{W_{min}}{\Sigma E^+} \quad (3)$$

蒸发的最终目的是在一定条件下, 通过消耗蒸发功使碱液中部分水蒸发为二次汽, 因此在特定蒸发目的下过程的理论功耗成为唯一的合理收益佣, 而佣衡算方程中  $\Sigma E^-$  的其它佣流支出均被视为非目的佣收益而计入外部佣损。因此目的佣效率定义式中分母项与分子项之差仍可以认为是  $\Sigma D$  不。

## (二)

关于烧碱蒸发装置佣效率定义式文献报导的有几种。根据上述定义佣效率定义式的过程可知, 它与所取用的衡算模型及其佣衡算方程相关, 在文献<sup>[6]</sup>提出有如下—组佣效率定义式:

$$\eta_{E1} = \Sigma E^- / \Sigma E^+ \quad (4-a)$$

$$\eta_{E2} = 1 - \Sigma D \text{不} / \Sigma E^+ \quad (4-b)$$

$$\eta_{E3} = W_{min} / \Sigma E^+ \quad (4-c)$$

上式中的  $\eta_{E1}$  称为过程佣效率;  $\eta_{E2}$  称为损耗佣效率;  $\eta_{E3}$  称为目的佣效率。该组佣效率公式系根据如下佣方程定义的:

$$\Sigma E^+ = \Sigma E^- + W_{min} + \Sigma D \text{不} \quad (5)$$

分析该组佣效率定义式及其所对应的方程本文认为:

(1)该组佣效率定义式的  $\eta_{E1}$ 、 $\eta_{E2}$  及  $\eta_{E3}$  三个式子具有相同的分母  $\Sigma E^+$ ; 由三个式子分析它们不可能同时满足分母项与分子项之差为  $\Sigma D$  不, 欲使  $\eta_{E1}$  满足此要求, 它将被定义为  $(\Sigma E^- + W_{min}) / \Sigma E^+$ , 如此改变将使  $\eta_{E1}$  与  $\eta_{E2}$  相同而成为一个佣效率的两种不同形式。

(2)该方程式的右方既包含有  $\Sigma E^-$  项又有  $W_{min}$  项。据该文献得知其衡算项目  $\Sigma E^+$  已包含喷射泵入口水佣而  $\Sigma E^-$  已包含喷射泵出口水佣也即在衡算项目中已包含有  $E^-_{二次汽}$ 。本文认为: 烧碱蒸发过程确有消耗蒸发理论功使碱液中的部分水蒸发为二次汽, 然而该理论功实际上已转化为二次汽的部分佣随着  $E^-_{二次汽}$  流出体系, 因此在佣衡算方程中不应重复计入  $W_{min}$  一项, 关于  $W_{min}$  已包含在  $E^-_{二次汽}$  之中的证明如下:

蒸发过程最小理论功的定义式为:

$$W_{min} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{H'}}\right) Q_{H'} - \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) Q_H \quad (6-1)$$

式中的  $T_{H'}$  及  $T_H$  分别为操作压力下溶液与水的沸点;  $Q_{H'}$  及  $Q_H$  分别为溶液与水在  $T_{H'}$  及  $T_H$  温度下的汽化潜热;  $T_0$  为环境的温度。

整理上式:

$$W_{min} = (Q_{H'} - Q_H) - T_0 \left( \frac{Q_{H'}}{T_{H'}} - \frac{Q_H}{T_H} \right) \quad (6-2)$$

在可逆蒸发过程中,  $T, P$  恒定:

$$Q_{H'} = H_{H'}^v - H_{H'}^w = \Delta H_F = (H_{H'}^v - H_0) - (H_{H'}^w - H_0) \quad (6-3)$$

$$\frac{Q_{H'}}{T_{H'}} = \Delta S = S_{H'}^v - S_{H'}^w = (S_{H'}^v - S_0) - (S_{H'}^w - S_0) \quad (6-4)$$

$$\text{同理} \quad Q_H = (H_H^v - H_0) - (H_H^w - H_0) \quad (6-5)$$

$$\frac{Q_H}{T_H} = (S_H^v - S_0) - (S_H^w - S_0) \quad (6-6)$$

式中的上标  $v$  指水蒸汽、 $w$  指液态水;  $H_0, S_0$  分别为基准态下的焓、熵值。

若将式(6-3)、(6-4)、(6-5)、(6-6)代入式(6-2), 并根据佣的定义式:

$$b = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (6-7)$$

可得

$$W_{min} = b_{H'}^v - b_{H'}^w - b_H^v + b_H^w$$

$$b_{H'}^w = W_{min} + b_{H'}^v + (b_{H'}^w - b_H^w) \quad (6-8)$$

式中  $b_{H'}^v$  与  $b_H^v$  分别为在操作压力下溶液沸点  $T_{H'}$  与纯水沸点  $T_H$  下二次蒸汽与饱和水蒸汽的佣值。( $b_{H'}^w - b_H^w$ ) 为碱液因沸点上升而引起溶液中水佣值的变化, 由式(6-8)可知  $W_{min}$  项为二次汽佣的一部分, 故不应重复计入方程, 否则依该方程定义佣效率将获得如下的佣效率式:

$$\eta_{B'1} = \frac{\Sigma E^- + W_{min}}{\Sigma E^+} = 1 - \frac{\Sigma D^-}{\Sigma E^+} \quad (7-a)$$

$$\eta_{B'2} = \frac{\Delta E_{目} + W_{min}}{\Delta E_{推}} \quad (7-b)$$

显然, 由以上公式计算的佣效率值将与本文提出方程所定义的佣效率值不同, 其数值可见表 1 所示(该数据根据文 5 测定结果分别按二种方程定义的佣效率计算)。

表 1 佣方程对佣效率的影响

项 目	1, 2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	1—5 <sup>#</sup>	备 注
$\eta_{B1} = \Sigma E^- / \Sigma E^+ (\%)$	78.97	83.04	50.23	42.28	38.13	
$\eta_{B'1} = \frac{\Sigma E^- + W_{min}}{\Sigma E^+} (\%)$	82.86	86.32	62.10	50.10	48.73	
$\Delta / \eta_{B'1} (\%)$	4.93	3.95	23.60	17.94	27.72	$\Delta = \eta_{B'1} - \eta_{B1}$
$\eta_{B2} = \frac{\Delta E_{目}}{\Delta E_{推}} (\%)$	73.44	53.40	35.52	54.83	31.89	
$\eta_{B'2} = \frac{\Delta E_{目} + W_{min}}{\Delta E_{推}} (\%)$	78.35	62.16	59.75	65.13	44.73	
$\Delta / \eta_{B2} (\%)$	6.69	16.40	68.21	18.79	40	$\Delta = \eta_{B'2} - \eta_{B2}$

由上表可见两者有较大差别, 尤其对于佣效率较低的 4<sup>#</sup> 蒸发器影响最显著。

在文<sup>[7]</sup>还看到另一种烧碱装置的佣效率公式, 它是根据蒸发过程的简化流程所导出的佣衡算方程定义的。该佣效率公式的  $\Sigma E^+$  与  $\Sigma E^-$  项目只包括有进出体系的汽、水佣值即:

$$\eta_B = \frac{E^-_{\text{二次汽}} + E^-_{\text{冷}}}{E^+_{\text{汽}}} \quad (8)$$

本文曾将上式用<sup>[5]</sup>所测定数据进行计算并与本文提出的佣效率公式计算值进行比较, 同时还详细计算各蒸发器总佣收支中的物佣收支所占比例请参见表 2 计算结果。

表 2 物流佣对蒸发装置佣效率的影响 单位:  $10^3 \text{kcal/hr}$

项	装 置	1.2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	1—5 <sup>#</sup>
1	总佣收入	4631.6	1598.9	1103.7	2206.1	5198.0
	物佣收入	589.3	974.0	529.0	133.2	589.3
	物佣的比例%	12.72	60.92	37.53	6.03	11.33
2	总佣支出	3657.5	1327.7	708.64	937.0	1982.0
	物佣支出	974.0	581.9	164.17	121.8	212.2
	物佣的比例%	26.63	43.76	23.26	13.0	10.70
3	物佣收支差 $\Delta B$	384.7	393.1	364.3	11.3	377.1
	占总佣收入比例%	8.3	24.59	25.81	0.5	7.25
4	蒸发过程佣效率 $\eta_{B1}$ (计入物佣)	78.97	83.04	50.23	42.48	38.13
	蒸发过程佣效率 $\eta_{B'1}$ (不计入物佣)	67.91	122.88*	52.88	26.86	30.19
5	蒸发装置佣效率 $\eta_{B2}$ (计入物佣)	73.44	53.40	35.52	54.83	31.89
	蒸发装置佣效率 $\eta_{B'2}$ (不计入物佣)	62.96	120.77*	88.24	55.15	42.45
备注	*此效率值已超百。					

由表 2 数据可知在蒸发过程中其物佣值占总佣的收、支均有相当比例, 且各装置收支物佣值相差一般较大, 又无一定规律性, 因此本文认为: 以化工产品为目的的工艺过程佣分析不同于一般动力循环过程, 它除了热源供热外还有原料及产品的物佣流进出; 有相变热佣并常伴有化学反应热佣, 就本烧碱蒸发过程还涉及热的多次重复使用, 因此忽略物流佣进行常规化工过程的佣分析及计算其过程或装置佣效率会得出与实际情况较大的偏离结果。表 2 计算结果说明这一点, 且在 3<sup>#</sup> 蒸发器还出现超百的不合理佣效率值。

此外, 在文献[6—8]中见到在蒸发装置佣分析的衡算项目中对  $E^+_{\text{电}}$ 、 $E^+_{\text{晶}}$  及  $E^-_{\text{盐}}$ 、 $E^-_{\text{浓}}$  的处理各不相同, 有的全忽略, 有的只计入部分项目, 本文认为: 上述四项的每一单项佣值占总佣收或支均不大, 即使四项全忽略(由于二项收入与二项支出相差不大)对分析的结果也不产生重大影响, 但该四项佣值是客观存在的, 作为佣分析法探讨应将其一一计入, 当然, 在工业上为简便计算可考虑将其部分项目忽略, 至于其中的  $E^-_{\text{盐}}$  一项则可根据各厂对分离盐带出物理佣的回收情况放在  $\Sigma E^-$  或  $\Sigma D$  不均。

## 结 束 语

本文比较并讨论了目前提出的烧碱蒸发装置的几种能耗效率定义式, 讨论了能耗衡算方程对能耗效率定义式的影响并提出如下几点看法:

1. 本文认为: 正确的能耗效率定义式必须符合能耗效率规律及基本要求。
2. 本文根据 B·Linnhoff 二成分能耗平衡模型及相应方程提出烧碱蒸发装置的过程能耗效率, 装置能耗效率及目的能耗效率公式。
3. 本文认为烧碱蒸发装置的能耗方程中既然  $\Sigma E^-$  项目已包含有  $E^-$  二次汽(或喷射泵进出口水耗), 就不应重复计入  $W_{min}$  项。
4. 本文认为进行烧碱蒸发装置的常规能耗分析务必采用全入式热平衡<sup>[9]</sup>数据(即包括物耗流)为依据, 若采用忽略物耗流的能耗衡算方程定义能耗效率公式及进行能耗效率计算将使能耗分析结果偏离实际情况。

## 参 考 文 献

- [1] Baehr H·D, BWK, 20, 5(1968), 197.
- [2] 何耀文、陈震藩, 化学工程, 4—6(1979).
- [3] Linnhoff B., Smith R., I·Chem·Eng Symposium Series, 56(1979).
- [4] 杨东华, 工程热物理学报, 2, 1(1981).
- [5] 叶璧如, 张夏平, 华侨大学学报, 1(1986).
- [6] 杭州化工研究所、杭州电化厂, 氯碱工业, 5, (1982), 18.
- [7] 朱晓明, 氯碱工业, 2, (1983), 45.
- [8] 李宜泉, 第四届化学工程学校际学术报告会论文集, (1984).
- [9] 国家计委会等, 企业热平衡, 机械工业出版社, (1983).

**Discussion of Some Problems in the Analysis  
of Exergy for the Evaporating  
Device of Sodium Hydroxide**

Ye Pilu    Zhang Xiaping

**Abstract**

The paper is discussing the analysis of exergy for the evaporating device of sodium hydroxide about the exergy balance equation, the efficiency formula of exergy and the calculation of theoretical minimum work for evaporating process. In the paper the author offered some different views on the above problems.