

糖厂低温热能利用及其焓评价*

叶壁如 张夏平

(化工与生化工程系)

摘要 对大型糖厂蒸发站用能进行焓分析及对其低温热能利用的焓评价。

关键词 糖厂蒸发站, 低温热能利用, 焓分析, 焓评价

0 前言

有效地利用能源是世界瞩目的重大研究课题。纵观化工轻工生产过程, 少不了有不同数量、形式及品位的低温热能排出系统, 对其合理回收并有效地利用将可明显降产品能耗, 提高企业的能源利用率。我省是全国三大产糖省份之一, 有30余厂日榨蔗能力超500t, 据统计全省百吨蔗的标煤耗各厂相差甚远。1984年平均煤耗7.5t, 最高的厂达9.9t。某大型糖厂自80年代开始节能降耗, 使其从1983年的6.27t降至1987年的5.08t, 接近国家计划于2000年达到的平均煤耗水平, 但与国内能耗仅4.07t的先进厂相比, 仍存有差距。我们在考察糖厂低温热能的产生及利用时, 肯定其合理之处并探索其节能潜力所在。

1 焓分析法在制糖节能研究中的应用

制糖工艺包含压榨、中和、澄清、蒸发、炼煮、结晶、分蜜和干燥包装等典型化工过程, 蒸发是能耗大的关键工序、目前国内多采用多效顺流蒸发工艺, 它在大量耗能同时又产生了大量不同数量、温位的汁汽和冷凝水低温热能, 应用焓分析手段考察并评价它们的利用, 可了解关键用能装置的热力学完善性并有效促进制糖生产的节能。焓分析法是当前世界公认并广为应用的节能诊断技术, 它以热力学一、二定律为依据和热力学效率为主要指标, 从能量数量变化及其质量变质观点分析过程内部及外部存在的不可逆损失, 克服目前大中企业普遍进行能量平衡分析法的片面性及局限性, 为节能分析提供科学的理论根据。

本文1991-12-19收到。

福建省自然科学基金资助课题。

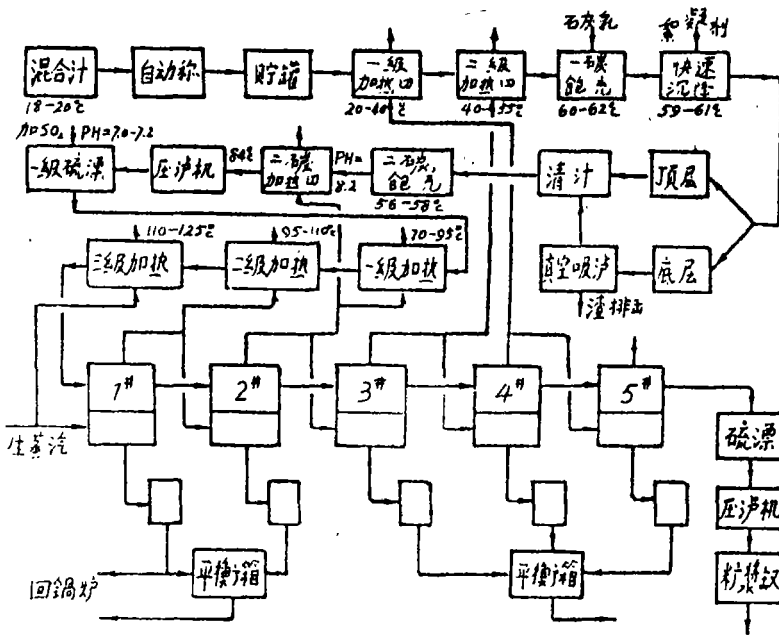


图1 蒸发、澄清流程示意图

焓分析法包含有七项内容。(1)确定分析体系及建立其焓平衡模型。本文将蒸发站分为两种

种体系:(a)为单个蒸发器体系;(b)为蒸发器系列体系,该厂蒸发系列有两种即称新蒸发系列为

五效顺流流程;称旧系列者则在五效顺流流程之前多用一个零效煮水罐。进入蒸发前的中和澄清流程相同详见图1。它们的物料衡算及焓衡算模型见图2、3。(2)确定各体系的焓流及其计算。因蒸发系物理过程故只计及其物理焓。基准态取实测时的状态(温度、压力),并将过程简化为稳流过程。焓流包括有物流焓,指进出体系的混合汁、清汁及糖浆的物理焓 B_{Mi} ;能流焓,指进出体系的蒸汽、汁汽及冷凝水的物理焓

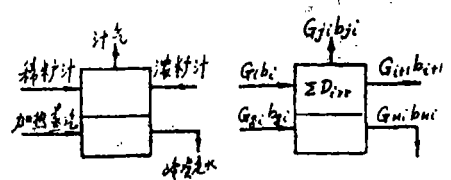


图2 单个蒸发器衡算模型

的状态(温度、压力),并将过程简化为稳流过程。焓流包括有物流焓,指进出体系的混合汁、清汁及糖浆的物理焓 B_{Mi} ;能流焓,指进出体系的蒸汽、汁汽及冷凝水的物理焓

B_{Ei} ;热流焓,指进出体系相变热及化学反应热的物理焓 B_{Qi} 。它们焓值计算如下

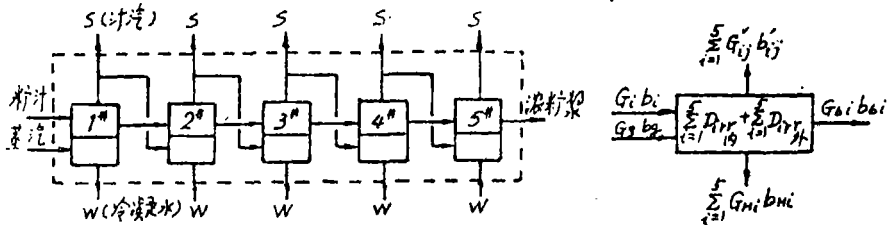


图3 蒸发系列的衡算模型

$$B_{Mi} = G_i \left\{ \int_{T_0}^T C\bar{P} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dT + \int_{P_0}^P [\bar{V} - (T - T_0) \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial T} \right)_P] dP \right\}_i,$$
$$B_{Ei} = G_{g(Hi,j)} [(H - H_0) - T_0(S - S_0)]_{g(Hi,j)}, B_{Qi} = G_i Q_i \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)_i.$$

其中 $G_i, \bar{C}\bar{P}, T, P, \bar{V}$ 分别为进出 i 蒸发体系糖汁、清汁及糖浆的流量、平均比热、温度、压力及比容; $G_{g(Hi,j)}, H, S$, 分别为进出 i 体系蒸汽、汁汽、冷凝水的流量、焓、熵; Q_i 为 i 物流单位流量的相变热或反应热; T_0, P_0, H_0, S_0 为基准态的温度、压力、焓和熵. (3) 确定各体系的熵衡算方程. 依照熵衡算的普遍规律、进入体系的各熵流之和 $\sum B_i^+$ 等于流出体系熵流之和加上体系的总熵损 $\sum D_{irr}$. 结合本厂的蒸发体系有如下的衡算式

$$\sum B_i^+ = \sum B_i^- + \sum D_{irr}, \quad \sum D_{irr} = \sum D_{irr内} + \sum D_{irr外};$$

对于单个蒸发器参照图2, 有

$$G_i b_i + G_s b_s = G_j b_j + G_H b_H + G_{i+1} b_{i+1} + \sum D_{irr};$$

对于蒸发系列参照图3, 有

$$G_i b_i = G_s b_s = \sum_{i=1}^5 G'_{ij} b'_{ij} + \sum_{i=1}^5 G_{Hi} b_{Hi} + G_s b_s + \sum_{i=1}^5 D_{irr内} + \sum_{i=1}^5 D_{irr外}.$$

其中 $\sum D_{irr内}$ 为总内熵损; $\sum D_{irr外}$ 为总外熵损. (4) 各体系内外熵损的计算, 外熵损只计算其热损的熵值而内熵损则包括有蒸发系统的流动熵损、传热熵损及蒸发熵损, 计算方法见文[3]. (5) 过程最小理论功的计算可参照文[3]. 糖汁的最小理论蒸发功 W_{min} 系指在 i 蒸发体系操作条件下、糖汁中的水蒸发为汁汽与相同条件下由纯水蒸发为蒸汽的理论功耗之差, 即

$$W_{min} = G_j \{ [(T_H' - T_0)/T_H'] Q_{H'} - [(T_H - T_0)/T_H] Q_H \}_i,$$

式中 $T_H', Q_{H'}$ 及 T_H, Q_H 分别为在 i 蒸发体系条件下糖汁的沸点、汽化热及纯水的沸点与汽化热. (6) 定义出反映装置或过程热力学完善程度的熵效率公式. 本蒸发过程的熵效率采用文[3] 本作者建议的3种效率公式 η_{B1}, η_{B2} 及 η_{B3} 表达式如下

$$\eta_{B1} = \frac{\sum B^-}{\sum B^+} = 1 - \frac{\sum D_{irr}}{\sum B^+}, \quad \eta_{B2} = \frac{\Delta B_M}{\Delta R_L}, \quad \eta_{B3} = \frac{W_{min}}{\sum B^+}.$$

(7) 给出体系熵衡算表从数值上表示收支熵流及熵损的比例, 并用熵流图形象表示熵流产生、走向及损失的原因、分布, 本文熵流图略.

2 工艺流程及热力学参数

糖厂的澄清、中和蒸发工艺流程示意图见图1. (热力学参数表, 略).

3 熵分析结果

附表1—3中分别列有各蒸发体系熵衡算、熵衡算、熵损分布、熵效率、最小理论蒸发功及低温热能利用等情况.

4 讨论及熵评价

4.1 热效率及熵效率分布

分析结果表明:(1)各蒸发装量热效率焓效率均较高,说明其生产控制较平稳、内外焓损较低、汽抽用较好,保温及防止跑糖措施较好;(2)从热效率分布(表2)看呈凹状,而焓效率依序降低.这是因热效率只反映设备外损的情况而焓效率依序下降是因蒸发器温度依序下降而糖汁浓度依序增大、导致流体内阻增从而增大流体流动焓损及传热焓损.要提高总焓效率务必采取改善末二效的糖汁流动及传热的措施;(3)比较新旧两系列效率可见相差甚小,但旧系列的蒸发器内加热管已改用铜质,且在系列之前多用煮水罐作零效、理应高于新系列.由此可见旧系列在生产控制、抽汽利用尚有潜力未被利用,同时说明煮水罐的加用尚应进一步考察与权衡其利弊、以决定取舍.

4.2 汽的利用

汽利用是节能降耗的关键.(1)该厂在改进汽利用采用有力经济措施鼓励抽用汽煮糖使能耗逐年下降、但旧系列的五效排出汽焓值和为 $9294.6 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$,相当于系列收入蒸汽焓值 $4015.4 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ 的2.3倍.而现已利用仅47—62%.新系列五效排出汽焓值和为 $4501.2 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ 为系列收入蒸汽的1.7倍,现已利用仅59—74%,可见仍有潜力可挖.(2)目前蒸发系列出口糖浆锤度低于60Bx以下,甚至在55Bx以下.糖浆过稀使煮糖汽耗增大,因此建议应严格控制蒸发出口糖浆锤度高于60Bx,尔后再安排多余汽的合理利用.(3)依厂原热力方案要抽汽至4*效,用它加热混合汁,然而,实际查定两列装置的汽均只抽至3*效/而国内先进厂均已抽至4*效甚至5*效,故建议对热力方案制定及实施改进.(4)根据按质供能及能量匹配的科学用能原则分析,混合汁一级加热只需20—40℃,二级加热40—55℃,显然抽用4*效5*效、甚至冷凝水都可用,而将余下4*效汽用于二碳汁及清汁一级加热并保留原方案1*及2*汽的利用,降低汽利用的传热焓损及能耗.

4.3 冷凝水的回收利用

厂冷凝水回收一般只包含1*及2*效,3*、4*、5*效的冷凝系集中在平衡水箱供车间工艺用水.据统计目前冷凝水回收进锅炉的量是系列生蒸汽量的116%,分别只占70—80%,而回收的热水焓只占排出量的40—50%.因此,建议将3*、4*、5*效冷凝水先采用串联逆流热交换预热混合汁再供工艺用水;对于尚有20%的1*2*效冷凝水争回收并尽量减少过程的降温损失、既可减少硬水软化费用又同时可多回收热焓.

4.4 采用热泵新技术提高低温热能的利用

目前,我国大中型糖厂都辅有自己动力设备供电,且只利用背压蒸汽供蒸发之用,常将富余电力无偿地并入地方电网.因此,若能以此富余电力供压缩式热泵提高汽温位及供吸收式热泵提高冷凝水温位,将可使低温热能利用更好,建议进行这方面的试验并权衡其技术及经济的可行与否.

5 结论

(1)目前我省大型糖厂蒸发工艺仍存在节能潜力,应进一步改善末效蒸发过程的流动及传热状况,并开发低温热能的回收及合理利用.(2)在制糖工艺中引入热泵技术以提高低温热能利用,是值得研究的课题.

参 考 文 献

[1] 萧成基、蒋楚生、何耀文、化工新技术,中国化工学会出版,(1982).
[2] Beabr,. H. D. ,工程热力学理论基础及工程应用,科学出版社,(1987)1.
[3] 叶璧如,烧碱蒸发装置的熵分析与节能探讨,华侨大学学报(自然版),9,4(1988),512-522.
[4] 华南工学院等,甘蔗制糖工艺学,轻工业出版社,(1982).

Utilization of Heat Energy at Lower Temperature
and Evaluation of Its Exergy

Ye Biru Zhang Xiaping

(Department of Chemical and Biochemical Engineering)

Abstract An exergy analysis is made on the energy used by the evaporator station of a large scale sugar refinery, and an exergy evaluation is given to the utilization of heat energy at lower temperature.

Key words evaporator station of sugar refinery, heat energy utilization, exergy analysis, exergy evaluation.

附表1 蒸发系列的焓衡算表 (单位 $\times 10^{-4} \text{kJ/kg}$)

| 蒸发 系列 | 蒸发器 | 收入焓 | | 总收入 | 支出焓 | | | 总支出 | 热焓损 | 蒸发器的热 效率(%) |
|-----------------------------|------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|----------------|
| | | 糖液焓 | 蒸汽焓 | | 糖液焓 | 汁汽焓 | 冷凝水焓 | | | |
| 新 系 列 | 1# | 4420.5 | 9699.5 | 14120.0 | 2980.9 | 8949.6 | 1836.5 | 13767.0 | 353.0 | 95.51 |
| | 2# | 2980.9 | 4761.6 | 7742.6 | 1874.7 | 4723.3 | 815.5 | 7413.5 | 329 | 91.66 |
| | 3# | 1874.7 | 2823.0 | 4697.6 | 1279.7 | 2806.7 | 415.1 | 4501.5 | 196.1 | 91.86 |
| | 4# | 1279.7 | 1715.9 | 2995.6 | 894.2 | 1702.1 | 223.9 | 2890.2 | 175.3 | 88.25 |
| | 5# | 8942.2 | 1700.7 | 2594.9 | 510.4 | 1883.5 | 188.1 | 2582 | 13.0 | 99.14 |
| | 1-5# | 4420.5 | 9699.5 | 1412.0 | 510.4 | 20065.2 | 3479.1 | 9922.3 | 1066.5 | 82.85 |
| 旧 系 列 | 0# | 23711.5 | 14439.4 | 16810.9 | 0 | 13519.9 | 2870.7 | 16390.6 | 420.3 | 96.37 |
| | 1# | 5430.2 | 13517.8 | 18948 | 3233.7 | 12792.5 | 2448.1 | 18474.3 | 473.7 | 95.72 |
| | 2# | 3233.6 | 6260. . | 9494.5 | 1972.7 | 6228.2 | 1043.8 | 9244.7 | 249.8 | 95.21 |
| | 3# | 1972.7 | 2331.2 | 4303.9 | 1429.0 | 2315.2 | 356.0 | 4100.2 | 203.7 | 89.69 |
| | 4# | 1429.0 | 1747.6 | 3176.6 | 1050.2 | 1736.9 | 232.9 | 3020.2 | 156.6 | 89.67 |
| | 5# | 1050.2 | 1735.2 | 2785.4 | 474.7 | 2095.0 | 201.8 | 2771.5 | 13.9 | 99.09 |
| | 0-5# | 7801.7 | 14439.4 | 22241.1 | 474.7 | 38687.7 | 7153.4 | 20723.2 | 1517.9 | 79.17 |

附表 2 蒸发系列的烟核算表 (单位, $\times 10^{-4} \text{kJ/kg}$)

| 蒸发 系列 | 蒸 发 器 | 收入烟 | | 总烟 收 入 | 支出烟 | | | 总烟 支 出 | 烟损 | | 蒸 发 功 (%) | 过 程 烟 效 率 (%) | 传 递 烟 效 率 (%) | 目的烟 效率 (%) | |
|----------|-------------|--------|--------|-----------|-------|--------|--------|-----------|-------|--------|--------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------|
| | | 糖液烟 | 蒸汽烟 | | 糖液烟 | 计汽烟 | 凝水烟 | | 外烟损 | 内烟损 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 新 | 1# | 662.8 | 2631.7 | 3294.5 | 456.6 | 2268.7 | 302.6 | 3027.9 | 97.64 | 169.0 | 266.64 | 13.18 | 91.99 | 88.55 | 0.43 |
| | 2# | 456.6 | 1199.3 | 1656.0 | 256.7 | 1081.4 | 123.2 | 1461.8 | 82.27 | 112.32 | 194.59 | 15.57 | 88.25 | 81.92 | 0.94 |
| | 3# | 256.7 | 638.0 | 894.7 | 158.7 | 587.9 | 55.22 | 801.7 | 44.75 | 48.22 | 92.97 | 14.31 | 89.61 | 84.05 | 1.6 |
| | 4# | 158.6 | 354.3 | 512.8 | 97.04 | 309.8 | 26.75 | 433.6 | 35.39 | 43.91 | 79.30 | 13.85 | 84.54 | 75.80 | 2.7 |
| | 5# | 97.04 | 304.8 | 401.8 | 43.92 | 253.4 | 19.45 | 316.8 | 2.108 | 82.91 | 85.02 | 32.75 | 78.84 | 70.21 | 8.4 |
| | 1-5* | 662.8 | 2631.7 | 3294.5 | 43.92 | 2004.7 | 52.73 | 2576.0 | 262.2 | 456.4 | 718.6 | 91.59 | 78.19 | 65.86 | 2.78 |
| 旧 | 0# | 367.0 | 4015.4 | 4382.4 | 0 | 3567.6 | 494.4 | 4061.9 | 120.8 | 199.7 | 320.5 | 4.6 | 92.69 | 90.90 | 0.11 |
| | 1# | 818.5 | 3558.7 | 4377.2 | 486.1 | 3189.5 | 372.4 | 4048.0 | 128.8 | 200.3 | 329.2 | 18.6 | 92.48 | 89.67 | 0.43 |
| | 2# | 486.1 | 1550.3 | 2036.4 | 274.7 | 1453.9 | 154.5 | 1883.1 | 63.4 | 899 | 153.4 | 13.0 | 92.47 | 89.01 | 0.64 |
| | 3# | 274.7 | 541.2 | 815.9 | 180.3 | 490.6 | 48.5 | 719.4 | 47.3 | 49.2 | 96.5 | 10.7 | 88.18 | 80.42 | 1.31 |
| | 4# | 180.3 | 367.3 | 547.6 | 119.7 | 333.5 | 28.3 | 481.4 | 33.1 | 33.2 | 66.2 | 11.8 | 87.91 | 80.47 | 2.16 |
| | 5# | 119.7 | 327.7 | 447.4 | 38.2 | 259.7 | 22.1 | 320.1 | 2.1 | 125.2 | 12.73 | 43.8 | 71.55 | 58.34 | 9.8 |
| | 0-5* | 1185.5 | 4015.4 | 5200.9 | 38.2 | 2949.5 | 1120.2 | 4107.9 | 395.5 | 697.5 | 1093 | 102.6 | 78.98 | 62.25 | 1.97 |

附表3 汁汽及冷凝水回收利用情况(单位 kJ×10⁻⁴/kg)

| 类别 | 回收及利用的项目 | 新系列 | | 旧系列 | |
|------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 焓值 | 焓值 | 焓值 | 焓值 |
| 汁汽收入 | 0#汁汽 | | | 加热1# | 加热1# |
| | 1# | 4188.2 | 1069.2 | 6531.6 | 1639.2 |
| | 2# | 1900.0 | 443.4 | 3897.0 | 547.6 |
| | 3# | 1091.0 | 233.6 | 567.6 | 123.3 |
| | 5# | 1884.0 | 253.4 | 2095.0 | 259.7 |
| | 总收入 | 9063.2 | 1999.6 | 17971.2 | 2569.8 |
| 汁汽利用 | 用于煮糖 | 1900—2241 | 550—660 | 2375—2860 | 670—807 |
| | 用于清汁二级加热 | 1018—1202 | 90—100 | 1571—1984 | 110—122 |
| | 混合汁加热 | 1418—1836 | 213—250 | 1730—2238 | 260—308 |
| | 二碳汁加热 | 1656—2140 | 283—462 | 2019—2620 | 346—564 |
| | 总利用 | 5992—7419 | 1138—1472 | 7699—9702 | 1386—1801 |
| | 汁汽利用率% | 66.11—81.86 | 58.91—73.60 | 58.9—74.22 | 47.23—61.37 |
| 凝水回收 | 0#冷凝水 | | | (2870.7循环用) | |
| | 1# | 1836.5 | 302.2 | 2448.1 | 372.4 |
| | 2# | 815.1 | 123.2 | 1043.8 | 154.5 |
| | 3# 415.1 | 415.1 | 55.22 | 356.0 | 48.5 |
| | 4# | 223.9 | 26.72 | 232.9 | 28.3 |
| | 5# | 188.1 | 19.45 | 201.8 | 22.1 |
| | 总收入 | 3479.1 | 527.3 | 4282.7 | 625.8 |
| 利用 | 回收到锅炉 | 1344 | 228.5 | 1920.0 | 326.0 |
| | 利用率% | 38.3 | 43.3 | 44.6 | 52.07 |