

甘蔗糖厂热力循环判别准则

翁荣周 杨翔翔

(化学化工系)

摘 要

本文对甘蔗糖厂中常用的三种典型热力循环(背压式热电循环,抽汽冷凝式热电循环和节流式热电循环)进行了用效率的分析,导出了热力循环优劣的简捷的统一判别式,它无需繁杂的计算,应用方便,对热力循环方案的选择和改进等方面均具有一定的指导意义。

前 言

制糖是从含糖植物中提取糖份的过程,在制糖过程中需要的热能、机械能和电能,除使用外部电的厂外,都是依靠燃烧大量的燃料,如煤、蔗渣、木柴等来供应的。整个生产过程的动力就是热的转换形式,因此制糖过程需要消耗大量的能源,据统计,糖厂中能源的费用约占总成本的10%以上,目前我国糖厂百吨甘蔗耗标煤率平均为7~15%,我省轻工业厅制糖工业公司提出要求,希望在近几年内能移下降到5%以下。为了减少燃料的消耗,节约能源,不但要有合理的工艺过程,更要恰当地组织好热力方案,改善糖厂中的热利用。因此,研究提高全厂的热力循环效率,建立合理的热电平衡关系,对于提高经济效益具有重大的经济意义。

制糖工艺过程耗用的蒸汽量是相当大的,工艺耗汽量对蔗比一般为50~70%(省糖业公司要求能降低到40%以下),由于制糖工艺过程并不需要高温高压的蒸汽,为了适应这种热利用的特点,糖厂中通常都是采用热电合产的热力循环系统^[1],但是它有许多不同方案的热力循环,目前糖厂中比较典型的热力循环有三种,即背压式热电循环,抽汽冷凝式热电循环和节流式热电循环。这样就自然地提出了一个如何简捷而又合理的判别这些循环优劣的问题。

过去,人们往往采用基于热力学第一定律的热效率法作为判别的准则,然而,它只注意到热能在量上的利用,忽视了能量在质上的差别,所以热效率法是有一定的局限性。

近几年来,焓(有效能)概念和焓分析在热力过程分析中被广泛地采用^[2-4],基于热力学第二定律的焓效率,既考虑了能量在量上的多寡,又考虑了能量在质上的差异,因此它是一个比较合理的效率定义。但是直接采用焓效率来判别糖厂中的热力循环却比较复杂,计算量较大,实用性较差。

本文在一些可比条件假设下，利用焓效率导出了热力循环效率与抽汽状态焓的关系式，它对糖厂中几种典型的热力方案都适用，利用它可以简捷地判别出热力循环的优劣。

二、基本假设与热力学模型

对上述三种热力循环，我们作如下一些基本假设：

- (1) 循环的初参数相同，蒸汽的冷凝压力相同；
- (2) 热用户所需蒸汽的热量及蒸汽参数相同；
- (3) 背压式循环的汽轮机背压及温度等于热用户所需的蒸汽压力和温度；
- (4) 忽略泵功的影响；
- (5) 忽略系统散热和压力损失。

在上述假设条件下，三种热力循环的热力学系统可综合如图 1 所示。图 1 中，当节流阀 IV 关闭，汽轮机 II 的抽汽量为零时，来自锅炉 I 的高温高压蒸汽在汽轮机膨胀做功并在背压 p_c 下引出至热用户 V 供热，此即是背压式热电循环；当节流阀 a 关闭，一部份蒸汽在汽轮机上的 p_d 处抽汽并经节流阀 b 节流至热用户所需的蒸汽压力时供热，其余蒸汽则排入冷凝器 III，此即为抽汽冷凝式热电循环；当来自锅炉的一部份蒸汽经节流阀 a 节流后引至热用户供热，而其余蒸汽经汽轮机膨胀做功后排入冷凝器时，此即为节流式热电循环。在实际情况下不应有节流阀 b 和混合加热器 VII，后者是为了进行方案比较时，不同方案能有相同的给水温度才添加的。

三种热力循环的 T-S 图如图 2 所示。

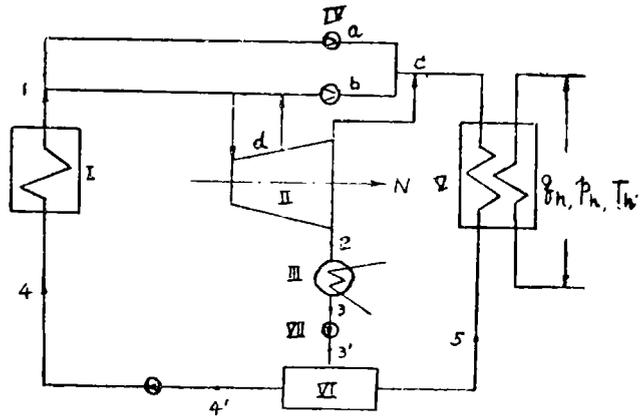


图 1 三种热力循环的系统图
 I—锅炉 II—汽轮机 III—冷凝器 IV—节流阀
 V—热用户 VI—混合加热器 VII—水泵

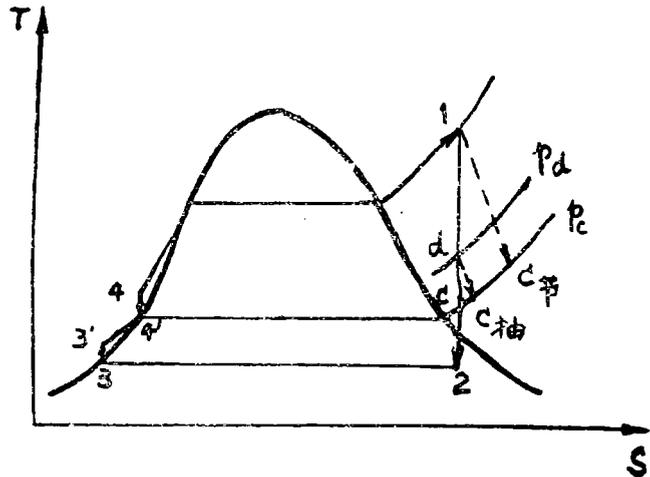


图 2 热力循环的 T-S 图

三、热力循环的判别准则

三种热力循环都具有相同的蒸汽初参数和相同的给水状态，也就是说，一公斤工质在锅炉中的吸热量和焓增量都将相同。

现在计算抽汽量 α ，参看图 3，根据混合加热器 VI 的热平衡可知

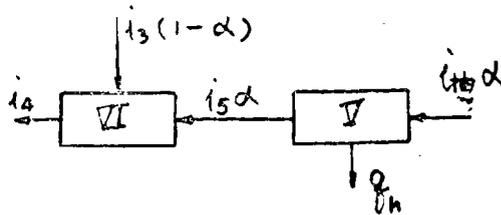


图 3 热用户 V 和混合加热 VI 的热平衡

$$(i_{抽} - i_5) = q_h \tag{1}$$

$$i_5 \alpha + i_3 (1 - \alpha) = i_4 \tag{2}$$

式中 α 、 i_5 均为未知数，现将两式相加并消去 i_5 即可求得抽汽量 α

$$\alpha = \frac{i_4 - i_3 + q_h}{i_{抽} - i_3} \tag{3}$$

式中 i_3 、 i_4 及 q_h 均为定值，因此，抽汽量 α 仅是抽汽状态焓 ($i_{抽}$) 的单值函数，只要抽汽压力确定，所需供热的抽汽量 α 即可确定，根据式 (3) 可知

$$-\frac{d\alpha}{di_{抽}} < 0$$

所以供热抽汽量随着抽汽点往前移也即抽汽压力的提高而减少。

下面我们来确定焓效率，其焓平衡方程为：

$$E_1 - E_4 = N + E_h + E_e \tag{4}$$

式中

E_1 ——锅炉出口处蒸汽的焓； E_4 ——锅炉入口处给水的焓；

N ——汽轮机的有用功； E_h ——热用户的焓； E_e ——整个系统的焓损失。

根据焓效率的定义有：

$$\eta = \frac{N + E_h}{E_1 - E_4} \tag{5}$$

但是根据热平衡方程有：

$$q_b = N + q_c + q_h$$

故

$$N = q_b - q_c - q_h$$

式中

q_b ——一公斤工质在锅炉中的总吸热量, q_c ——冷凝器中冷却水量带走的热量,
 q_h ——热用户的吸热量。

现将式(6)代入式(5)可得:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{1}{E_1 - E_4} (q_b - q_c - q_h + E_h) \\ &= \frac{1}{E_1 - E_4} (q_b - q_c - q_h \frac{T_o}{T_h})\end{aligned}\quad (7)$$

但是

$$\begin{aligned}q_c &= (1 - \alpha) \cdot (i_3 - i_2) \\ &= (1 - \alpha) \cdot \Delta i_c\end{aligned}$$

将上式并连同式(3)一起代入式(7), 可得

$$\eta = \frac{1}{E_1 - E_4} \left(q_b - \frac{i_{\text{抽}} - i_4 - q_h}{i_{\text{抽}} - i_c} \cdot \Delta i_c - q_h \frac{T_o}{T_h} \right)\quad (8)$$

式中

T_o ——环境温度, T_h ——热用户要求的温度, Δi_c ——蒸汽在冷凝器中的焓降。

在式(8)中, E_1 、 E_4 、 q_b 、 Δi_c 、 i_3 、 i_4 、 q_h 、 T_o 和 T_h 均为已知, 所以, 热力循环的焓效率 η 仅是抽汽状态焓 $i_{\text{抽}}$ 的函数, 由式(8)可得

$$\frac{d\eta}{di_{\text{抽}}} = - \frac{1}{E_1 - E_4} \cdot \frac{\Delta i_c (q_h + i_4 - i_3)}{(i_{\text{抽}} - i_3)^2} < 0$$

显然, 热力循环的焓效率 η 随着抽汽状态焓 $i_{\text{抽}}$ 的增加而降低, $\eta \sim i_{\text{抽}}$ 之间的关系如图4所示。

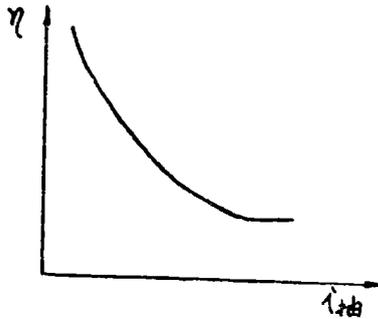


图4 $\eta \sim i_{\text{抽}}$ 关系图

对于背压式热电循环、抽汽冷凝式热电循环和节流式热电循环等三种情况, 根据热力学原理可知, $i_{\text{背}} > i_{\text{抽}} > i_{\text{节}}$, 因此必然有

$$\eta_{\text{背}} > \eta_{\text{抽}} > \eta_{\text{节}}$$

这样, 我们利用关系式(8)便可以简捷地判断不同热力循环的优劣次序, 并可算出焓效率的具体数值。因此, 式(8)可以作为热力循环的判别准则。

四、实 例

设工质为水, 各循环参数如下:

$$p_1 = 35 \text{ bar}, t_1 = 350^\circ\text{C}$$

$$p_2 = 0.04 \text{ bar},$$

$$p_c = p_h = 3 \text{ bar}, t_r = 133.5^\circ\text{C}$$

$$\text{选抽汽压力 } p_d = 8 \text{ bar}, q_h = 2048 \text{ kJ/kg}$$

根据水蒸汽图表可查得下列数据:

$$j_4 = 561.4 \text{ kJ/kg}, t_4 = t_h = 133.5^\circ\text{C}, S'_4 = 1.67 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$$

$$i_1 = 3105 \text{ kJ/kg}, s_2 = s_1 = 6.68 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}, i_2 = 2025 \text{ kJ/kg}$$

$$i_c = 2610 \text{ kJ/kg}$$

$$i_3 = 121.4 \text{ kJ/kg}, t_3 = 28.9^\circ\text{C}, s'_3 = 0.42 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$$

$$i_d = i_{\text{抽}} = 2780 \text{ kJ/kg}, i_{\text{节抽}} = 3105 \text{ kJ/kg}, i_{\text{背抽}} = i_c = 2610 \text{ kJ/kg}$$

$$t_o = 20^\circ\text{C}, i_o = 84 \text{ kJ/kg}, s_o = 0.296 \text{ kJ/kg}\cdot\text{k}$$

通过计算得到下列各值:

$$q_b = i_1 - i_4 = 2543 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta i_o = i_1 - i_3 = 1903.6 \text{ kJ/kg}$$

$$E_4 = (i_4 - i_o) - T_o (s_4 - s_o) = 74.4 \text{ kJ/kg}$$

$$E_1 = (i_1 - i_o) - T_o (s_1 - s_o) = 1151 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{节}} = 0.69$$

$$\eta_{\text{抽}} = 0.88$$

$$\eta_{\text{背}} = 0.99$$

参 考 文 献

- [1] 无锡轻工业学院、华南工学院编著, 甘蔗制糖工艺学, 轻工业出版社, (1982)。
- [2] 严济慈, 热力学第一和第二定律, 人民教育出版社, (1978)。
- [3] 钱立伦等, 有效利用余热的热力学新判别准则, 西安交通大学学报, (1983)。
- [4] 杨东华, 焓及熵分析, 力学与实践, 4 (1979), 1 (1980)。