

郎肯循环在回收低品位废汽余热中的应用

韩 继 先

(化工系)

回收工业生产中的余热是节能技术中的重要课题,对于高品位的余热用废热锅炉来生产蒸汽作为热源加以利用,或通过热力发动机转换成为机械能,这早已被很多生产部门所注意,并已得到相当广泛的应用。然而对于低品位的工业余热则在很长一段时期内由于种种原因却一直被人们所忽视,这种情况直到世界性的能源危机出现以后才有所改变。

轻化工业中低品位废汽余热资源广泛存在,回收这种余热一般可分为两大类:

1) 当余热的品位可以满足用户的要求时,余热即可直接作为热源加以利用。若余热的品位不能满足用户的要求,此时可以用热泵将其品位作适当的提高,热后再作为热源来加以利用。

2) 将余热转换成机械能,进而电能。实现这转换的方法有多种,本文所讨论的是用郎肯循环来实现这种转换。目前常规热力发电厂所使用的热力循环就是在郎肯循环的基础上发展起来的,技术上已相当成熟,但是把工业生产中低品位废汽余热作为热源来实现郎肯循环却是一个新的课题。

一、工质的选择

常用工质水对于以低品位废汽余热作为热源的郎肯循环已经不再适用。有多种低沸点的有机工质可供选择。对于工质的选择应从热力学性质,热稳定性,毒性和易燃性等几个方面来考虑。 $R-113$ 的临界参数为 $t_{\text{临}} = 214.5^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{临}} = 33.7$ 公斤/厘米²,常压下沸点为 47.5°C ,在低品位工业余热的温度范围内具有良好的热稳定性。这种有机工质用于回收低品位余热是比较合适的,一则有足够的传热温差,而且设备的受压也不高,再则在 $T-S$ 图上 $R-113$ 的干饱和蒸汽线的斜率为正值,这就避免了工质在膨胀机内膨胀做功时出现干度 $x < 1$ 的可能。

二、流程简介



工质在蒸发器中被加热由液相转变成汽相,汽相工质被引入膨胀机内膨胀而对外做功,乏汽从膨胀机排入冷凝器放热从汽相转变成液相,液相工质通过泵升压重新被送入蒸发器即完成循环(图1)。

本文1984年9月30日收到

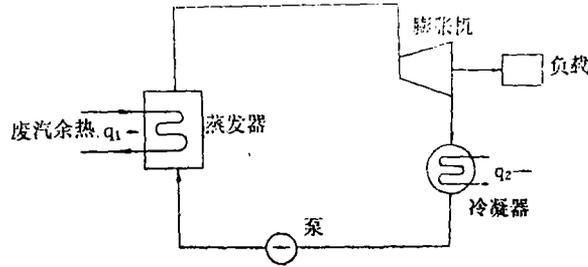


图1 郎肯循环流程图

三、转换效率

将循环示于 Logp—i 图及 T—S 图上:

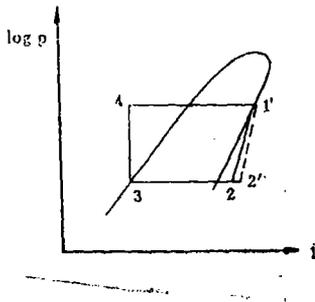


图2 Logp—i 图

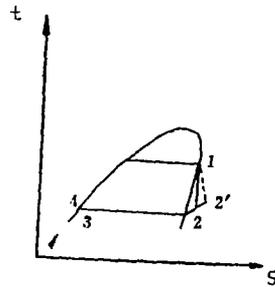


图3 T—S 图

1. 理想郎肯循环的热效率 η_{Rci}

若忽略泵所消耗的外功

$$\eta_{Rci} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4}$$

由于实际过程有热损失以及膨胀过程的不可逆性，实际循环的实际效率 η_{Rca} 应为:

$$\eta_{Rca} = \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_4} = \frac{i_1 - i_2'}{g_1} \eta_E$$

g_1 —实际供入蒸发器的热量

i_2' —实际膨胀过程排汽焓

η_E —蒸发器热效率

本文所讨论的循环系统是采用 100℃ 左右的饱和水蒸汽来模拟轻化工厂废汽余热资源的。当采用 100℃ 饱和水蒸汽作为郎肯循环的热源，25℃ 的冷却水作为冷源，并选定工质 R—113 在 4kg/cm² 的压力下蒸发，排汽压力为 0.55kg/cm²，此时

$$i_1 = 151.5 \text{ kcal/kg}$$

$$i_2 = 114.6 \text{ kcal/kg}$$

$$i_3 = i_4 = 107.0 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{理想热效率 } \eta_{Rci} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_a} = \frac{6.9}{44.5} = 15.1\%$$

2. 实际郎肯循环的热效率 η_{Rca}

实际膨胀机的排汽焓 $i_2 = 145.9 \text{ kcal/kg}$

蒸发器的热效率 $\eta_E = 0.83$

$$q_1 = \frac{i_1 - i_a}{\eta_E} = \frac{131.3 - 107}{0.83} = 53.6 \text{ kcal/kg}$$

$$\eta_{Rac} = \frac{i_1 - i_2}{q_1} = \frac{151.5 - 145.9}{53.6} = 10.4\%$$

循环中主要热损失:

1) 蒸发器中热损失

$$1 - \eta_E = 1 - 0.83 = 17\%$$

2) 冷凝器中热损失 q_2

$$q_2 = i_2 - i_3 = 145.9 - 107.0 = 38.9 \text{ kcal/kg}$$

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{38.9}{53.6} = 72.6\%$$

表1 系统热平衡表(kcal/kg)

输入热能	输出功		热损失	
(kcal/kg)	(kcal/kg)	(%)	(kcal/kg)	(%)
53.6	5.6	10.4	48	89.6
			其中: 蒸发器	17
			冷凝器	72.6

3. 循环的焓效率

作用平衡的一般公式

$$c_{\text{入}} = c_{\text{出}} + c_{\text{贮存}} + c_{\text{损失}} + w_{\text{输出功}}$$

对于郎肯循环来说

$$c_{\text{入}} = c_{\text{a1}}$$

$$c_{\text{出}} = 0$$

$$c_{\text{贮存}} = 0$$

$c_{\text{损失}}$ = 系统焓损失总和

w = 系统输出功

定环境参数 $\rho_0 = 1 \text{ kg/cm}^3$ $T_0 = 298^\circ \text{K}$

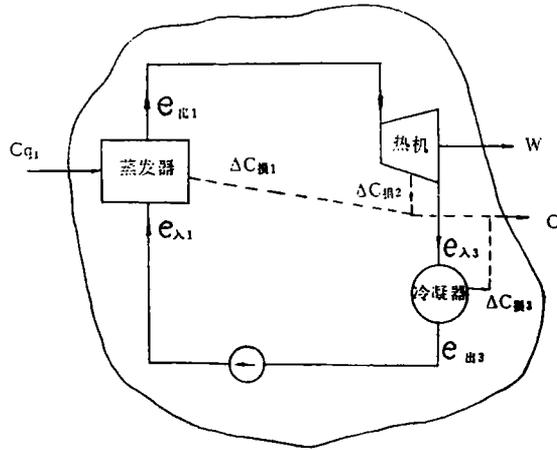
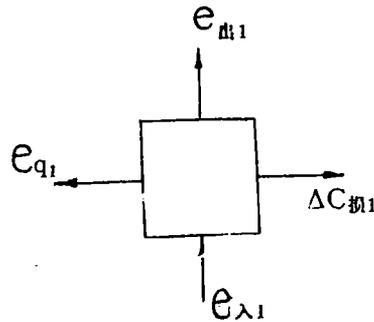


图4 郎肯循环系统焓平衡图

1) 蒸发器的焓平衡



$$e_{q1} = q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) = 53.6 \left(1 - \frac{298}{373} \right) = 10.78 \text{ kcal/kg}$$

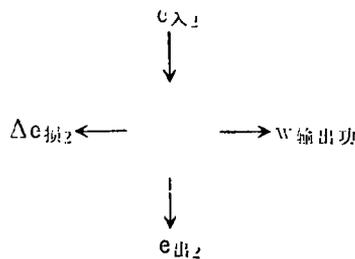
$$e_{入1} = (i_4 - i_0) - T_0(S_4 - S_0)$$

$$e_{出1} = (i_1 - i_0) - T_0(S_1 - S_0)$$

$$\begin{aligned} \Delta e_{损1} &= e_{q1} + e_{入1} - e_{出1} = e_{q1} + (i_4 - i_1) - T_0(S_4 - S_1) \\ &= 10.77 + 107 - 151.5 - 298(1.024 - 1.148) \\ &= 3.23 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta e_{损1}}{e_{q1}} = \frac{3.23}{10.78} = 30\%$$

2) 膨胀机的焓平衡



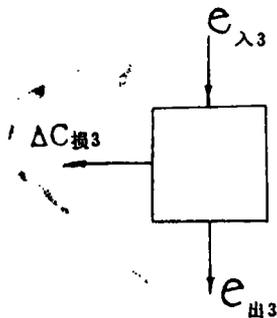
$$e_{\lambda_2} = e_{\text{出}1} = (i_2 - i_0) - T_0(S_1 - S_0)$$

$$e_{\text{出}2} = (i_2 - i_0) - T_0(S_{2'} - S_0)$$

$$\begin{aligned} \Delta e_{\text{损}2} &= e_{\lambda_2} - e_{\text{出}2} - W_{\text{输出功}} = (i_1 - i_2) - T_0(S_1 - S_{2'}) \\ &= (151.5 - 145.9) - 298(1.148 - 1.152) \\ &= 1.192 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta e_{\text{损}2}}{e_{\text{q}1}} = \frac{1.192}{10.78} = 11\%$$

3) 冷凝器的焓平衡



$$e_{\lambda_3} = e_{\text{出}2} = (i_2 - i_0) - T_0(S_{2'} - S_0)$$

$$e_{\text{出}3} = e_{\lambda_1} = (i_4 - i_0) - T_0(S_4 - S_0)$$

$$\begin{aligned} \Delta e_{\text{损}3} &= e_{\lambda_3} - e_{\text{出}3} = (i_2 - i_4) - T_0(S_{2'} - S_4) \\ &= (145.9 - 107) - 298(1.152 - 1.024) \\ &= 0.75 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta e_{\text{损}3}}{e_{\text{q}1}} = \frac{0.75}{10.78} = 7\%$$

$$e_{\text{损}} = \sum \Delta e_{\text{损}} = 32.23 + 1.192 + 0.75 = 5.178 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{焓效率 } \eta_{\text{焓}} = 1 - \frac{e_{\text{损}}}{e_{\text{q}1}} = 1 - \frac{5.178}{10.78} = 52\%$$

表2 系统焓平衡表

输入焓	输出功		损失焓	
(kcal/kg)	(kcal/kg)	(%)	(kcal/kg)	(%)
10.78	5.6	52	5.178	48
			其中: 蒸发器	30
			膨胀机	11
			冷凝器	7

四、讨 论

将工业余热回收直接作为热源来加以利用,在一般情况下其热效率都比较高,而且所需要的设备也比较简单,节能效果显著,投资少。因此对工业余热的回收通常应优先考虑这一类回收方案。

对于那些品位低而量却很大的工业废汽就近找不到相应热负荷的情况下,用郎肯循环将余热中的可用能部分地转换成机械能是可供选择的方案之一。其特点是突破了热负荷与余热资源相匹配的限制,在工质与膨胀机选择得当时可获得相当令人满意的转换效率。试验表明

以 R—113 为工质, 在相同的条件下多叶子迴转式的膨胀机的相对内效率高于透平膨胀机。

评价以低品位的废汽为热源的郎肯循环的效率不应从热效率着眼, 而应该以炯效率去衡量。因为从冷凝器中排出的热量尽管量很大但其中 90% 以上是炯。

参 考 文 献

- [1] J. A. Bond, and C. S. Robertson, "Low Temperature Rankine air Conditioning." southeastern conference on application of waste heat." Huntsville, Alabama, March, 1975.
- [2] Summer. C. M. "The conversion of energy" Sci. Amer. 225, 3, 1977.
- [3] J. Bjerkie, and S. Luchter, "Rankine cycle working fluid selection and specification Rationale", ASME. No. 67—6T—6 March, 1967.
- [4] W. M. Rohrer and G. E. Geiger "Waste Heat Recovery in a glass plant" 78—IPWR Industrial power conference, May, 1978.
- [5] S. E. Eckard, "Multi—Vane Expander as prime mover in waste heat application" ASME. 80—6551, Dec, 1980.