

吸附式制冷循环的分析^{*}

游全根¹ 孙旭² 王如竹²

(¹ 机械工程系 ² 上海交通大学制冷与低温工程研究所)

摘 要 以吸附式制冷循环的热力过程为依据,使用 分析的方法对连续回热循环作了分析,对循环中各部分 损进行了比较,指出了连续回热循环中 损的主要部位,并探讨了回热率及吸附床的传热性能对循环 效率的影响¹⁹。

关键词 吸附式制冷;连续回热型; 分析

分类号 TB 618

0 引 言

近年来,能源问题和环境问题日益突出,吸附式制冷由于可利用低品位能源和无环境污染等优点,引起了人们的普遍关注¹⁹但吸附式制冷所面临的最大困难是制冷循环效率低,为此,国内外学者纷纷从热力学的角度对吸附式制冷循环进行分析,以期找到影响吸附式制冷循环效率的关键因素,从而为改善吸附式制冷循环提供理论依据,并取得了较大的进展¹⁹。

从目前的有关资料看这方面的研究绝大多数局限于热力学第一定律的分析,很少有人从热力学第二定律角度进行有关分析,至于 分析法在吸附式制冷循环中的应用尚未有公开报道¹⁹因此,本文采用 分析的方法对吸附式制冷循环进行研究¹⁹。

1 连续回热型吸附式制冷循环的热力学分析

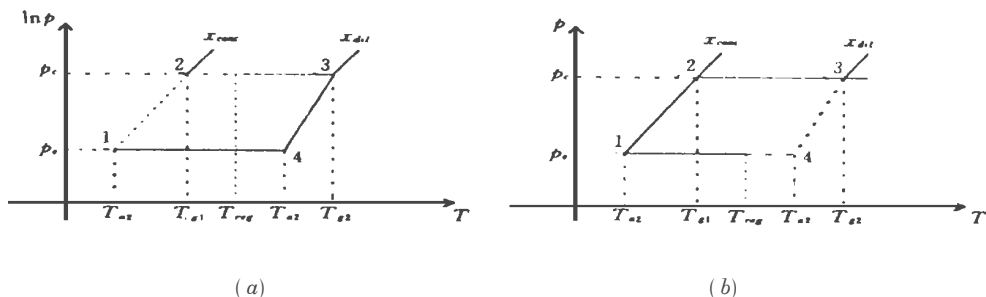


图1 连续回热型吸附式制冷循环图

在两床连续回热型循环中两个吸附床经历的热力过程完全相同,只是反相而已^[13]每个吸附床所经历的热力过程如图 1^[13]以下的分析选择活性炭—甲醇为吸附制冷工质对^[13]

1.1 加热过程 1→2→3

图 1 中 1→2 为加热升压过程,其加热量可采用下式计算

$$Q_h = \int_{T_{a2}}^{T_{g1}} c_{vc}(T) m_c dT + \int_{T_{a2}}^{T_{g1}} c_{va}(T) m_a dT, \quad (1)$$

m_a 、 m_c 、 c_{vc} 、 c_{va} 分别表示被吸附的甲醇的质量、活性炭的质量、活性炭的定容比热、甲醇的定容比热^[13]其中

$$m_a = m_c x_{conc}, \quad (2)$$

x_{conc} 表示温度 T_{a2} 时活性炭对甲醇的吸附率,由 D-A 方程可得

$$x_{conc} = x_0 \exp[-k(T_{a2}/T_c - 1)^n], \quad (3)$$

而 T_{g1} 可由下式确定

$$T_{g1} = T_{a2} \cdot T_c/T_e \quad (13) \quad (4)$$

图中 2→3 为加热解析过程,其加热量可采用下式计算

$$Q_h = \int_{T_{g1}}^{T_{g2}} c_{pc}(T) m_c dT + \int_{T_{g1}}^{T_{g2}} c_{pa}(T) m_c x dT + \int_{T_{g1}}^{T_{g2}} H m_c dx, \quad (5)$$

m_c 、 c_{pc} 、 c_{pa} 分别表示活性炭的质量、活性炭的定压比热、甲醇的定压比热^[13]

其中
$$x = x_0 \exp[-k(T/T_c - 1)^n], \quad (6)$$

解析热 H 可由下式确定

$$H = RA \cdot T/T_c \quad (13) \quad (7)$$

其中, R 和 A 分别为气体常数和 Clausius-Clapeyron 方程的系数^[13]则 1→3 过程中的平均加热温度为

$$T_{av} = \int dQ / \int \frac{dQ}{T} = \int_{T_{a2}}^{T_{g2}} \frac{dQ}{dT} dT / \int_{T_{a2}}^{T_{g2}} \left(\frac{dQ}{T dT} \right) dT \quad (13) \quad (8)$$

假设热流体与吸附床之间存在的温差为 T_{wc} , 环境温度为 T_0 , 则热流体需输给吸附床的热量值为

$$E_{hg1} = (Q_h + Q_g) [1 - T_0/(T_{av} + T_{wc})] \quad (9)$$

而吸附床得到的 值为

$$E_{hg2} = (Q_h + Q_g) (1 - T_0/T_{av}) \quad (13) \quad (10)$$

因此, 1→3 过程 损为

$$E_{wc} = E_{hg1} - E_{hg2} \quad (13) \quad (11)$$

1.2 冷却过程 3→4→1

图 1 中 3→4 为冷却降压过程,其放热量可采用下式计算

$$Q_c = \int_{T_{a1}}^{T_{g2}} c_{vc}(T) m_c dT + \int_{T_{a2}}^{T_{g1}} c_{va}(T) m_c x_{dil} dT, \quad (12)$$

则其 值为

$$E_c = \int_{T_{a1}}^{T_{g2}} c_{vc}(T) m_c (1 - T_0/T) dT + \int_{T_{a2}}^{T_{g1}} c_{va}(T) m_c x_{dil} (1 - T_0/T) dT \quad (13)$$

x_{dil} 表示温度 T_{a1} 时活性炭对甲醇的吸附率,由 $D-A$ 方程可得

$$x_{\text{dil}} = x_0 \exp[-k(T_{\text{a1}}/T_e - 1)^n] \quad (13)$$

而 T_{a1} 可由下式确定

$$T_{\text{a1}} = T_{g2} \cdot T_e/T_c \quad (15)$$

其放热量可采用下式计算

$$Q_{\text{ad}} = \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} c_{\text{pc}}(T) m_c dT + \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} c_{\text{pa}}(T) m_c x dT + \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} H m_c dx - \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} c_{\text{pag}}(T) (T - T_e) m_c dx, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{其 值为 } E_{\text{ad}} = & \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} c_{\text{pc}}(T) m_c (1 - T_0/T) dT + \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} c_{\text{pa}}(T) m_c x dT + \\ & \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} H m_c (1 - T_0/T) dx - \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} c_{\text{pag}}(T) (T - T_e) (1 - T_0/T) m_c dx \quad (17) \end{aligned}$$

$C_{\text{pag}}(T)$ 为甲醇的等压比热,其中

$$x = x_0 \exp[-k(T/T_e - 1)^n] \quad (18)$$

吸附热 H 可由下式确定

$$H = RA \cdot T/T_e \quad (19)$$

1.3 甲醇的冷凝过程

甲醇冷凝放热过程的放热量可采用下式计算

$$Q_{\text{cond}} = \int_{T_{g1}}^{T_{g2}} c_{\text{pag}}(T) m_c dx + (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) m_c L_e + \int_{T_c}^{T_{g2}} (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) c_{\text{pag}}(T) m_c dT, \quad (20)$$

其 值为

$$\begin{aligned} E_{\text{cond}} = & \int_{T_{g1}}^{T_{g2}} c_{\text{pag}}(T) m_c (1 - T_0/T) dx + (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) m_c L_e (1 - T_0/T_e) + \\ & \int_{T_c}^{T_{g2}} (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) c_{\text{pag}}(T) m_c (1 - T_0/T) dT. \quad (21) \end{aligned}$$

1.4 等容节流过程和蒸发制冷过程

甲醇节流前后温降负荷为

$$Q_{\text{co}} = \int_{T_c}^{T_e} (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) m_c C_{\text{vf}}(T) dT; \quad (22)$$

甲醇蒸发制冷吸热量为

$$Q_{\text{ref}} = (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) m_c L_e; \quad (23)$$

其 值分别为

$$E_{\text{co}} = \int_{T_c}^{T_e} (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) m_c C_{\text{vf}}(T) (1 - T_0/T) dT \quad (24)$$

$$\text{和 } E_{\text{ref}} = Q_{\text{ref}} (1 - T_0/T_{\text{ev}}) = (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}}) m_c L_e (1 - T_0/T_{\text{ev}}) \quad (25)$$

L_e 为甲醇的蒸发潜热^[13]

1.5 回热

回热的实质是利用一个吸附床加热过程中的放热加热另一个吸附床,从而减少能量的摄入,改善循环效率^[13]如果我们用 $Q_1(T)$ 表示加热量随受热吸附床的变化关系, $Q_2(T)$ 表示吸附

床放热过程中放热量随温度的变化关系,则

$$Q_1(T) = Q_h + \int_{T_{g^1}}^{\hat{T}} m_c C_{pc}(T) dT + \int_{T_{g^1}}^{\hat{T}} m_c X C_{pa}(T) dT + \int_{T_{g^1}}^{\hat{T}} H m_c dx, \quad (T_{g^1} < T < T_{g^2}) \quad (26a)$$

$$Q_1(T) = \int_{T_{g^1}}^{\hat{T}} m_c C_{vc}(T) dT + \int_{T_{g^1}}^{\hat{T}} m_c X_{conc} C_{va}(T) dT, \quad (T_{a^2} \leq T < T_{g^1}) \quad (26b)$$

$$Q_2(T) = Q_c + \int_T^{\hat{T}_{a^1}} m_c C_{pc}(T) dT + \int_T^{\hat{T}_{a^1}} m_c X C_{pa}(T) dT + \int_T^{\hat{T}_{a^1}} H m_c dx - \int_T^{\hat{T}_{a^1}} c_{pag}(T) m_c dx, \quad (T_{a^2} < T < T_{a^1}) \quad (27a)$$

$$Q_2(T) = \int_T^{\hat{T}_{a^1}} m_c C_{vc}(T) dT + \int_T^{\hat{T}_{a^1}} m_c X_{dil} C_{va}(T) dT, \quad (T_{a^1} \leq T < T_{g^2}) \quad (27b)$$

解方程

$$Q_1(T) = Q_2(T) \quad (13) \quad (28)$$

便可得理想回热情况下的回热温度 $T_{REG}^{(1)}(13)$ 而理想回热量 $Q_{REG} = Q_1(T_{REG}) = Q_2(T_{REG})$, 通常实际回热温度 T_{reg} 要小于理想回热温度 T_{REG} , 我们引入回热率 $A = (T_{reg} - T_{a^2}) / (T_{REG} - T_{a^2})$, 则实际回热量 $Q_{reg} = Q_1(T_{reg})$, 那么连续回热循环的平均加热温度也相应变为

$$T_{avh} = \int_{T_{reg}}^{\hat{T}_{g^2}} dQ / \int_{T_{reg}}^{\hat{T}_{g^2}} \frac{dQ}{T} = (Q_h + Q_g - Q_{reg}) / \int_{T_{reg}}^{\hat{T}_{g^2}} \left(\frac{dQ}{T dT} \right) dT \quad (13) \quad (29)$$

而回热量 Q_{ref} 中的 值为

$$E_{reg} = \int_{T_{a^2}}^{\hat{T}_{reg}} (1 - T_0/T) dQ_1(T) \quad (13) \quad (30)$$

假设热流体与吸附床之间存在的平均温差依然为 T_{wc} , 则热流体需输给吸附床的热量 值为

$$E_{rhg^1} = (Q_h + Q_g - Q_{reg}) [1 - T_0 / (T_{av} + T_{wc})], \quad (31)$$

其吸附床得到的 值为

$$E_{rhg^2} = (Q_h + Q_g - Q_{reg}) (1 - T_0 / T_{av}), \quad (32)$$

则温差 损为

$$E_{wc} = E_{rhg^1} - E_{rhg^2} \quad (13) \quad (33)$$

1.6 循环的性能参数

由于实际过程的复杂性,以及热流体及吸附床为动态变化过程,为了简化起见,这里不考虑加热器的 损失⁽¹³⁾实际分析过程中考虑加热器的 损失时可以采用平均 效率的方法⁽¹³⁾

对于基本循环,其制冷系数 COP 和 效率 U 分别为

$$COP = Q_{ref} / (Q_h + Q_g), \quad (34)$$

$$U = E_{ref} / E_{hg^1}. \quad (35)$$

对于连续回热型循环,其制冷系数 COP 和 效率分别为

$$COP = Q_{ref} / (Q_h + Q_g - Q_{ref}), \quad (36)$$

$$U = E_{ref} / E_{rhg^1}. \quad (37)$$

2 计算结果及讨论

采用梯形法计算积分值,计算中甲醇物理参数来源于文献[2],上海椰壳碳 YK 型的有关参数来源于文献[3],[4]⁽¹³⁾

2.1 各部分 损的分配

连续回热吸附式制冷循环的 流示意
如图 2 所示(13)方程为

$$E_{rhg} + E_{reg} = E_c + E_{ad} + E_{cond} + E_{eo} + E_{ref} + \sum \pi(13) \quad (38)$$

方程左边的诸项为各部分 损; π 为其他不可逆过程产生的 损失(13)

笔者以上海 YK 活性炭为例, 取 $X_0 = 0.284, K = 13.9, n = 1.51, T_{wc} = 283K, T_{a2} = T_0 = T_c = 303K, T_{ev} = 263K, T_{g2}$ 分别取 363K 和 373K, 计算出连续回热循环中各部分 值占总加热 值的百分比和各部分 损的 损系数(表 1)(13表中, $y_{wc}, y_{ead}, y_{cond}, y_{eo}$ 分别表示解析床的温差传热过程、吸附床的冷却过程、冷凝过程、节流过程的 损占总 损的比例数, 即 损系数(13)而 X_{reg} 表示回收的 占吸附床的冷却过程释放 的比例(13)其定义式分别如下:

$$y_i = E_i / (E_{rhgl} - E_{ref}), \quad (i = wc, cond, eo) \quad (39)$$

$$y_{ead} = (E_c + E_{ad} - E_{reg}) / (E_{rhgl} - E_{ref}), \quad (40)$$

$$X_{reg} = E_{reg} / (E_c + E_{ad}). \quad (41)$$

从表 1 可以看出, 在连续回热循环中, 冷却过程和温差传热几乎占据了循环中的全部 损失, 而冷凝过程和节流过程的 损失几乎可以忽略不计(13)在连续回热循环中, 回热回收了冷却过程流失 的一部分(约 20%), 但冷却过程仍然是 损的主要过程(13)

2.2 回热率 A 对循环性能的影响

以上海 YK 活性炭为例, 取 $T_{wc} = 283K, T_{a2} = T_0 = T_c = 303K, T_{ev} = 263K, T_{g2} = 373K$, 计算得出基本循环和连续回热循环中回热率 A 对循环性能的影响关系曲线, 如图 3(13)

A = 0 相当于基本循环, A = 1 相当于回热循环, 从图 3 可以看出, 连续回热循环的制冷系

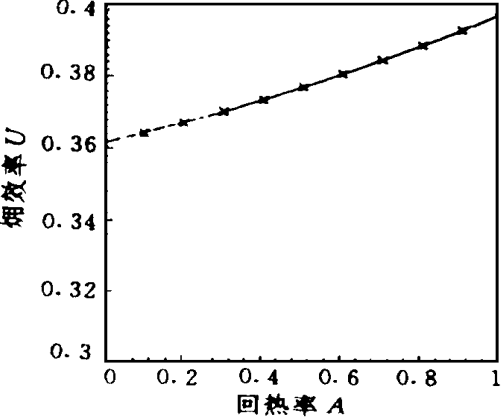


图 3 回热率对 效率的影响

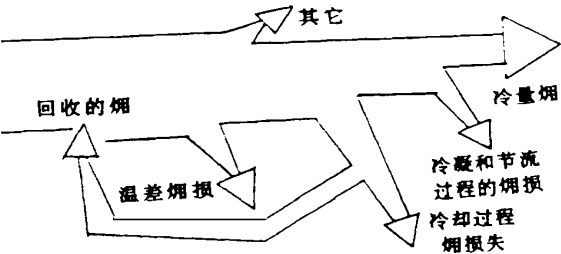


图 2 连续回热型循环的 流示意图

表 1 损系数表

系 数	$T_{g2} = 363K$	$T_{g2} = 373K$
y_{wc}	0.232	0.212
y_{ead}	0.690	0.684
y_{cond}	0.017	0.018
y_{eo}	0.024	0.026
X_{reg}	0.233	0.248

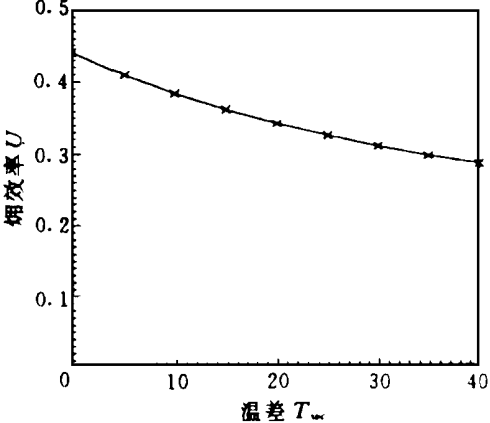


图 4 温差对 效率的影响

数 COP 和 效率依回热率 A 呈线性变化^[13]

2.3 传热温差 T_{wc} 对循环性能的影响

以上海 YK 活性炭为例, 取 $T_a = T_0 = T_c = 303\text{K}$, $T_{ev} = 263\text{K}$, $T_g = 373\text{K}$, 计算得出连续回热循环中传热温差 T_{wc} 对循环 效率的影响关系曲线, 如图 4^[13]从图中可以看出, 连续回热循环的 效率随传热温差 T_{wc} 的增大急剧下降, 但传热温差 T_{wc} 越大 效率下降的速度越慢^[13]

3 结 论

(1) 在连续回热循环中, 回热对循环性能有显著的改善, 它可以回收冷却过程流失 20% 左右, 但绝大部分 损仍然发生在吸附床的冷却过程, 怎样更好地利用这部分 , 提高吸附式制冷循环的 效率, 需要进一步研究^[13]

(2) 吸附床的传热性能对循环性能有着重要的影响, 改善吸附床的传热性能对提高循环的效率具有非常重要的意义^[13]

(3) 效率虽然与回热率呈线性变化关系, 但 效率没有随回热率的提高而大幅度增长^[13]这是因为两个吸附床直接传热时存在较大的温差, 这种大温差也是产生 损的重要原因^[13]因此, 回热方式对 效率提高也是不容忽视的, 从热波循环的巨大潜力可以看到这一点^[13]

参 考 文 献

- 1 滕毅, 王如竹¹⁹连续回热型活性炭-甲醇吸附式制冷循环研究¹⁹低温工程, 1995, (3): 48~52
- 2 石油化工基础数据手册¹⁹北京: 化学工业出版社, 1982
- 3 R Z Wang, J P Jia, Y H Zhu, J Y Wu, J Chen, Q B Waang, Study on a new solid adsorption refrigeration pair: active carbon fiber-Methanol, Journal of Solar Energy Engineering, ASME Transaction, 1997
- 4 Shi Wen, Wu jingyi, Wang ruzhu, Tang Zhongmei. Experiment measurement on the specific heat of highly porous materials. Proc. ICEC16, 1997

Exergy Analysis of Heat Recovery Adsorption Refrigeration Cycles

You Quangen¹ Sun Xu² Wang Ruzhu²

(¹ Mechanical Engineering Department

² Institute of Refrigeration and Cryogenics Shanghai Jiaotong University)

Abstract Based on thermodynamics of adsorption refrigeration cycle, a full exergy analysis of heat recovery adsorption refrigeration cycle is presented in this paper. The results show that the cooling process of adsorption bed plays a main role in exergy loss. Moreover, the effects of heat recovery ratio and heat transfer efficiency of adsorption bed on exergy efficiency has also been discussed.

Key words adsorption refrigeration; heat recovery; exergy analysis