

换热器的寿命周期经济学优化计算

韩 小 良

(北京科技大学)

利用换热器回收余热,是节能的重要途径之一,许多工业窑炉采用换热器后都收到了较好的节能效果。然而,在换热器的设计和选择时,多数企业仅考虑换热器的初投资费用大小,而未考虑换热器投入运行后燃料价格的变化、资金的时间价值、换热器的能源消耗以及维修费用等因素,因而许多换热器并未达到最优使用状况。本文对换热器寿命周期中的各种费用进行评价,并以此作为合理设计和选择的依据。

一、关于换热器的诸费用分析

1. 换热器的初投资费

换热器的初投资费(包括售价、安装费、贷款利率和维修费等)一般可分成与换热器换热面积 A 无关的固定费用 C_0 和与换热面积 A 成正比的 $C_A \cdot A$ 两部分,即初投资费 $= C_0 + C_A \cdot A$ 。考虑到资金的时间因素,即现在的资金在将来某个时候会产生与现在金额不同的价值,换热器在寿命周期(设为 n 年)内的投资费用 LCC_i (元)为:

$$LCC_i = P_1(C_0 + C_A \cdot A) \quad (1)$$

式中 P_1 为资金的现值系数^[1]。

2. 换热器的运行费

换热器的运行费主要是风机输送空气克服换热器压降所消耗的电力费用,可由下式计算

$$LCC_0 = \frac{P_2 C_e V_a \Delta P \cdot N}{3600 \times 1000 \cdot \eta_p} \quad (2)$$

式中 LCC_0 为换热器的寿命周期运行费(元), C_e 为电价格(元/kW·h), V_a 为空气流量(m^3/h), ΔP 为空气经换热器后的压降(P_a), N 为年工作时间(h), η_p 为风机连同电机在内的总效率, P_2 为电力价格的现值系数^[1]。

换热器的压降与空气流速、管径及布置方式和换热面积有关。当空气流速和管径及布置方式确定后,压降 ΔP 可表示为换热面积的线性关系:

$$\Delta P = a + bA \quad (3)$$

式中 a 和 b 为相应的系数。则换热器寿命周期运行费可写成:

$$LCC_0 = P_2(D_0 + D_A \cdot A) \quad (4)$$

式中 D_0 和 D_A 均为系数。

3. 换热器的寿命周期费用

换热器的寿命周期费用 LCC 由初投资费 LCC_i 和运行费 LCC_0 组成,即

$$LCC = P_1(C_0 + C_A \cdot A) + P_2(D_0 + D_A \cdot A) \quad (5)$$

换热器寿命周期费用 LCC 综合考虑了换热器寿命周期中的各种费用以及经济环境和能源环境对各种费用的影响, 因而利用 LCC 可以对换热器的经济性作出正确的评价。例如, 初投资小的换热器可能因压降大而增大寿命周期费用。

4. 换热器的燃料节约费

换热器投入运行后, 回收了热量 Q , 从而节约了燃料。换热器寿命周期内回收余热而节约的燃料费用 LCF 为:

$$LCF = P_3 C_F Q \cdot N / Q_d \quad (6)$$

式中 C_F 为燃料价格(元/kg 或元/Nm³), Q 为换热器回收热量(kJ/h), Q_d 为燃料的低发热量(kJ/kg 或 kJ/Nm³), P_3 为燃料价格的现值系数^[1]。

换热器回收热量 Q 为

$$Q = \varepsilon V_a C_a \cdot (t_g - t_0) \quad (7)$$

式中 ε 为换热器的温度效率, ε 可表示为传热单元数 NTU 的关系^[2]; C_a 为空气比热(kJ/m³·°C); t_g 为烟气进换热器温度(°C); t_0 为空气进换热器温度(°C)。

二、换热器的优化计算

利用换热器回收热量, 总希望回收热量所节约燃料效果大于换热器的投资, 并取得最大的经济效益。换热器寿命周期内取得的经济效益 LOS 为:

$$LOS = LCF - LCC \quad (8)$$

对换热器进行优化计算, 就是选取最佳换热面积 A , 使 LOS 最大, 这可通过下式求得:

$$d(LOS)/dA = 0, \quad \text{且 } LOS > 0 \quad (9)$$

可以证明, LOS 确实存在着最大值。为了求出最佳换热面积 A^0 和最佳预热温度 t_a^0 , 可利用直接计算法, 下面举例说明。

图 1 为顺流、逆流和叉流换热器的经济效益与换热器传热单元数的关系。由图 1 可知, 换热器有最佳传热单元数(或换热面积), 此时经济效益最大。逆流换热器所取得的经济效益最大(虽然它的投资也最大), 叉流次之, 顺流最小。在上述条件下, 三种换热器的最佳参数为: 顺流时, $NTU^0 = 1.70$, $A^0 = 33\text{m}^2$, $t_a^0 = 414^\circ\text{C}$, $LOS^0 = 81760$ 元; 叉流时, $NTU^0 = 2.45$, $A^0 = 48\text{m}^2$, $t_a^0 = 505^\circ\text{C}$, $LOS^0 = 114120$ 元; 逆流时, $NTU^0 = 4.55$, $A^0 = 88\text{m}^2$, $t_a^0 = 685^\circ\text{C}$, $LOS^0 = 176140$ 元。

当燃料种类及燃料耗量一定时, 影响换热器最佳参数的主要因素是燃料价格、换热器传热系数、烟气进换热器温度、换热器价格及换热器寿命。下面以逆流换热器为例予以说明。

图 2、3、4 分别为燃料价格 C_F 、换热器传热系数 K 和烟气进换热器温度 t_g 对换热器最佳参数的影响。当燃料价格上升时, 最佳换热面积相应增大, 而经济效益大幅度增加, 但最佳预热温度受燃料价格的影响不是太大。换热器传热系数提高也可提高经济效益, 同时换

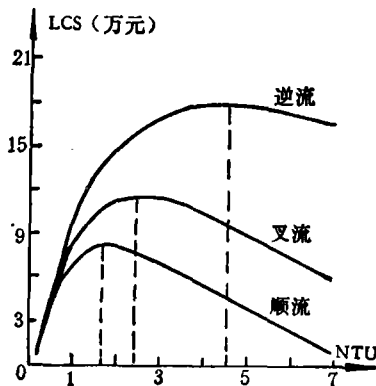


图 1 换热器经济效益与传热单元数的关系

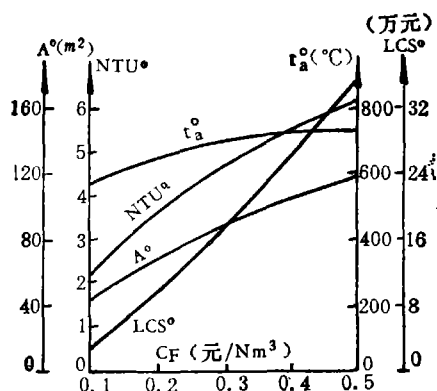


图2 燃料价格对换热器最佳参数的影响

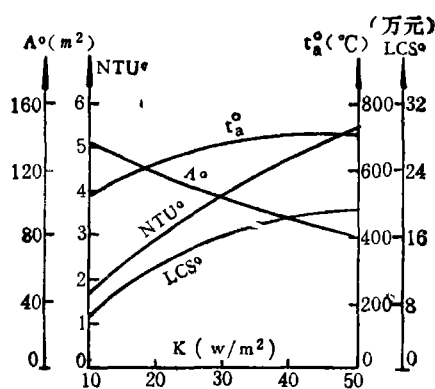


图3 传热系数对换热器最佳参数的影响

热面积减少。提高烟气温度, 换热器最佳参数均增大, 但应注意, 有一个最低的烟气温度, 在此温度时的经济效益为零, 而低于此温度时, 取得的经济效益为负值, 即利用换热器回收热量是亏损的。

当换热器售价提高时, 换热器的经济效益将减少, 其最佳参数也相应减小。

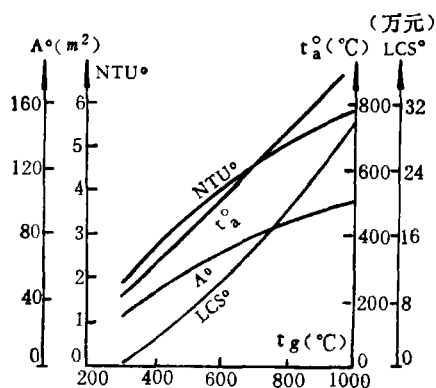


图4 烟气温度对换热器最佳参数的影响

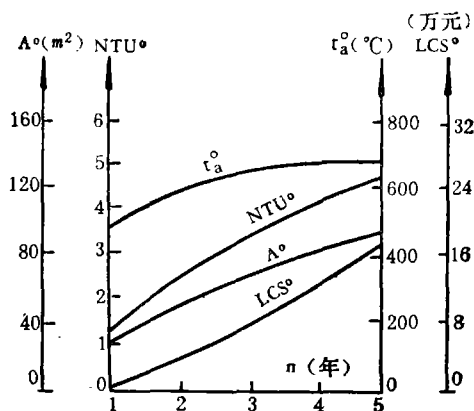


图5 换热器寿命对换热器最佳参数的影响

换热器寿命对换热器最佳参数也有很大的影响, 如图5所示。换热器寿命延长时, 换热器最佳参数均增大, 经济效益也提高。

综上所述, 可知换热器最佳参数(最佳换热面积和最佳预热温度)受到寿命周期内各种费用、经济环境和能源环境的影响。在设计和选择换热器时, 应综合考虑上述各种因素, 以作出最佳设计和选择。

参 考 文 献

- [1] J. W. Mitchell: Energy Engineering, John Wiley & Sons (1983)
- [2] W. M. Kays and A. L. London: Compact Heat Exchangers, 3rd ed., McGraw-Hill, New York (1984)