

# 燃气轮机余热锅炉的设计

吴亦三 (杭州余热锅炉研究所)

燃气轮机余热锅炉在原理上很简单,但它的设计必须满足整个发电系统的要求,因为余热锅炉的热效率直接影响联合循环的效率。因此,在余热锅炉的实际设计中,要具有独创性。

由于余热锅炉不仅必须与燃气轮机发电系统相协调,而且又要符合电站高效率化的要求,所以余热锅炉必须具备下述特性:

1. 由于燃气轮机的启动时间极短,所以要求余热锅炉能够快速启动;
2. 随着电力需求的变化,要求对锅炉负荷的变动有稳定的控制;
3. 为不使燃气轮机出力下降,要求余热锅炉尽量减少对烟气的阻力等。

为使燃气轮机余热锅炉达到优化设计,本文根据上述特性介绍影响设计的一些因素。

设计理论。余热锅炉传递的能量( $Q$ , kJ/h)可以用下式表示:

$$Q = WC_p(T_1 - T_4) = UA\Delta T \quad (1)$$

式中:

$W$ ——烟气流量, kg/h

$C_p$ ——烟气比热, kJ/kg $\cdot$ °C

$T_1, T_4$ ——分别为进出口烟气温度°C

$U$ ——总传热系数, kJ/m $^2$ ·h·°C

$A$ ——传热面积, m $^2$

$\Delta T$ ——对数平均温差

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_4}{\ln\left(\frac{T_1 - T_s}{T_4 - T_s}\right)} \quad (2)$$

把公式(2)代入(1),并简化可获得与 $T_1$ 和 $T_2$ 的有关公式(3),即

$$\ln n = \frac{T_1 - T_s}{T_4 - T_s} = \frac{UA}{WC_p} \quad (3)$$

式中

$T_s$ ——饱和蒸汽温度

总传热系数可以用下式表示:

$$U = 0.95hi \quad (4)$$

式中:

$hi$ ——内部传热系数, kJ/m $^2$ ·h·°C

可用下式表示:

$$NU = (hidi)/12k = 0.023(Re)^{0.8}(pr)^{0.4} \quad (5)$$

式中:

$N$ ——总的管子数量

$di$ ——管子内径, mm

$k$ ——烟气传热系数, kJ/m $^2$ ·h·°C

$pr$ ——烟气Prandtl数

$Re$ ——Reynolds数

受热面积 $A$ 可用下式表示:

$$A = Q/UA\Delta T \quad (6)$$

但为使余热锅炉设计优化,设计者应根据经济性、可用性、运行寿命和操作简易性进行选择,从而提出了改进燃气轮机余热锅炉设计的两条有效设计准则,用公式表示如下:

$$pp_{0p1} = \frac{p \cdot a}{h \cdot g} \times \frac{\eta_A}{\eta_D} \quad (7)$$

和

$$\frac{pp_2}{pp_1} = \frac{\eta_H}{\eta_N} \quad (8)$$

式中:

- $pp_{opt}$ ——最佳最小温差
- $pp_1$ ——第一最小温差
- $pp_2$ ——第二最小温差
- $p$ ——受热面比价
- $a$ ——每年年金
- $h$ ——每年运行时间
- $\eta_A$ ——设备总效率
- $\eta_D$ ——蒸汽循环效率
- $\eta_H, \eta_N$ ——特殊压力段转换效率
- $g$ ——热源

最小温差和接近点温差。最小温差和接近点温差是影响温度分布和蒸汽流量的两个重要变量因素,如图1所示。这两个因素直接影响余热锅炉的造价和蒸汽产量。

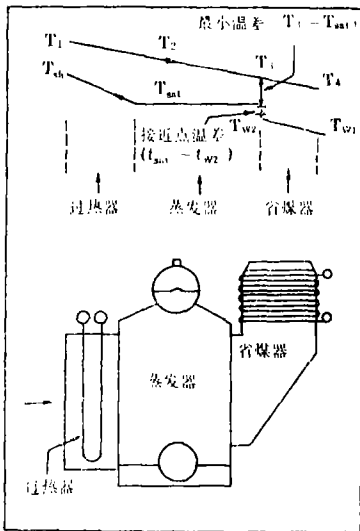


图1 余热锅炉内温度分布曲线

- $T_1, T_2, T_3, T_4$ ——烟温
- $T_{W1}, T_{W2}$ ——水温
- $T_s$ ——饱和温度
- $T_{sk}$ ——过热温度

余热锅炉内的典型温度水平分布(如图2所示),实质上是决定初温分布、蒸汽产量和受热面积的问题,所以如何解决好最小温差和接近点温差,对余热锅炉的优化设计是至关重要的。

最小温差是离开蒸发器的烟温与用系数

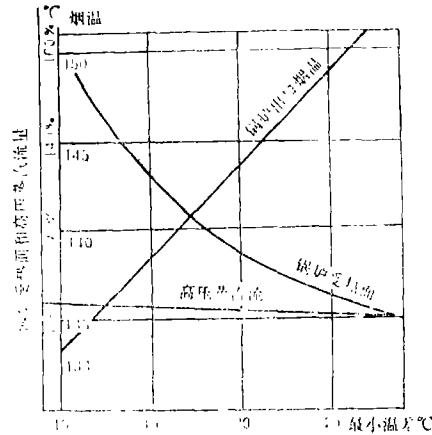


图2 余热锅炉的典型温度水平

$F$  测量蒸发器的蒸汽压力相应的饱和温度之差;接近点温差是离开省煤器的水温与饱和温度之差(见图1),它们一般在10~20℃之间。

设计中取较低的最小温差和接近点温差值时,意味着在蒸发器和省煤器内的对数平均温差都被降低,结果蒸发量增加而使锅炉效率上升,但因受热面和烟气阻力增大而使余热锅炉的造价增大。最小温差、接近点温差和烟气阻力的变化对总费用和热回收量的影响分别如图3a, 3b, 3c和3d所示。因此,必须通过分析最小温差和接近点温度来确定余热锅炉受热面积(反映基建费用)、烟气阻力和蒸汽产量(反映运行费用和节约),以实现最佳组合的优化设计。

在过份降低最小温差值的设计中,必须考虑在低的最小温差下可能发生不良的结果。例如,在烟气热容量可能有2%的误差时,如最小温差取122℃,则设计受热面的差额为1%,而取11℃时,则设计受热面的差额为15%以上。虽然,降低接近点温差可能在那个压力水平上产生更多的蒸汽,但正如较低的最小温差那样,这只能在较大的费用和烟气阻力相应增大的条件下获得。为减少在较低负荷时或启动期间省煤器内可能发生的汽化,在设计时可取较高的接近点温差,即18℃左右,但必须保证余热锅炉具有较高

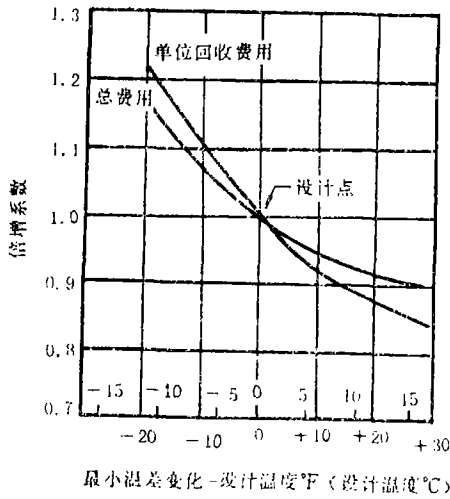


图 3a 最小温差变化对总费用和单位回收费用的影响

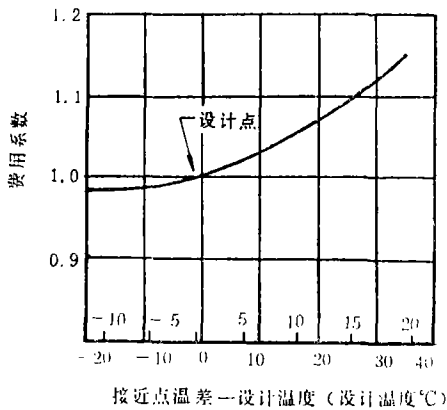


图 3b 接近点温差对热回收系统费用的影响

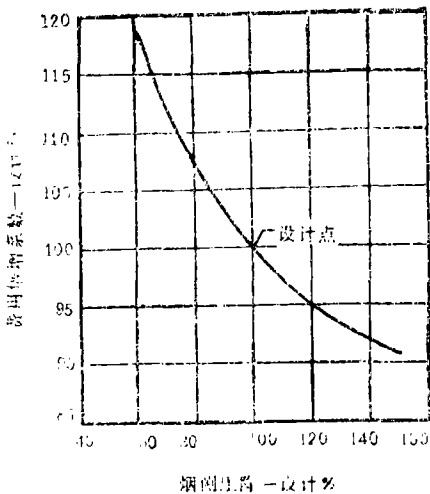


图 3c 烟侧允许压降对热回收系统总费用的影响

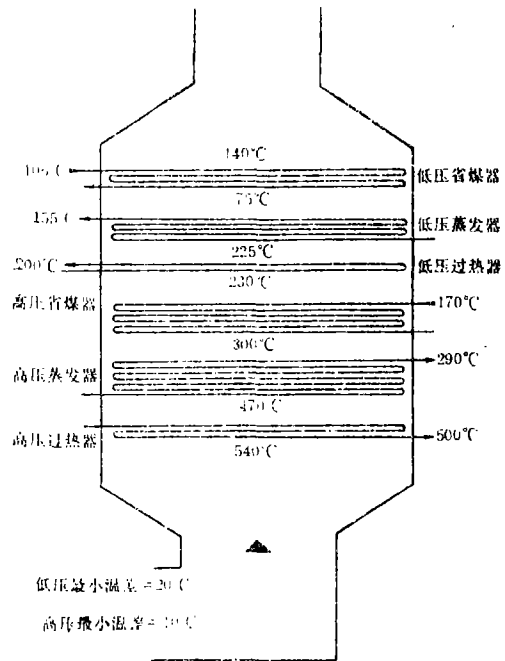


图 3d 锅炉受热面和产汽量变化随最小温差变化的强度水平。

然而，最小温差和接近点温差的值不能任意选择，它必须满足合理循环的要求，即：

$$WC_p(T_1 - T_3) = W_s(h_{s0} - h_{w2}) \quad (9)$$

$$WC_p(T_1 - T_4) = W_s(h_{s0} - h_{w1}) \quad (10)$$

公式 (9) 和 (10) 合并，得

$$\begin{aligned} & (T_1 - T_3)/(T_1 - T_4) \\ & = (h_{s0} - h_{w2})/(h_{s0} - h_{w1}) \end{aligned} \quad (11)$$

式中：

$W_s$ ——蒸汽流量

$h_{s0}$ ——过热器出口的蒸汽焓

$h_{w1}, h_{w2}$ ——过热器进出口的水焓

设计例：美国某一化工厂在 27°C 外界温度和每天 100% 出力条件下，选择蒸汽参数为 4.3MPa，339°C 过热温度和 68 吨/时的余热锅炉，是根据在宽范围条件下运行的余热锅炉，对过热器和省煤器设计和运行有较大影响为基础，并根据设计要求作了如下分析。

在无补燃工况中，从过热器来的终点汽

温最低为388℃，而燃气轮机排烟为410℃。因此，为获得要求的蒸汽量，必须补燃使排烟温度上升到610℃。但补燃仅仅使终点汽温上升到399℃，所以解决办法是设计无补燃工况下的过热器，而对补燃工况来说，这使过热器受热面大大超过，因为在补燃工况中，终点汽温达476℃，因而需要通过采用减温器在下游降低汽温。

宽范围运行引起的另一个问题，是省煤器汽化。为防止省煤器的汽化，在补燃工况中省煤器的接近点设计温差可取18℃。虽然，接近点温差低，省煤器能回收更多的热量，但如取得太低，则在低荷时省煤器内会出现汽化。防止省煤器内汽化的另一种办法是在省煤器内设计集箱（即将省煤器设计成2个小型省煤器），如图4所示。这种方法可减少省煤器受热面40%和防止在省煤器内形成任何汽化的趋势。由于采取上述一系列措施，圆满地解决了余热锅炉的设计。

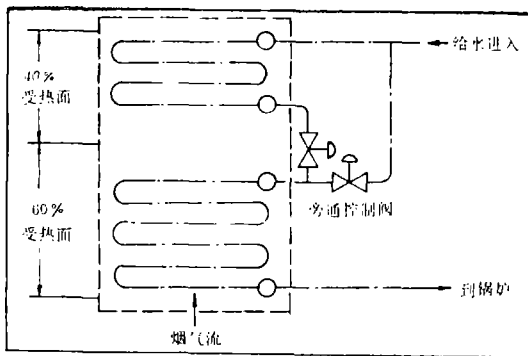


图4 省煤器的布置

国内在设计胜利油田二期工程的燃气-蒸汽联合循环余热锅炉时，考虑到锅炉热效率直接影响整个系统的循环效率，所以采用强制循环、单压和无补燃的结构布置设计。受热面采用螺旋翅片管和管箱大件组装等设计要求。烟道垂直布置，烟气由下而上冲刷受热面。为保证燃气轮机出力，烟气阻力控制在<3.9kPa范围内。根据设计参数，在中压工况下运行时，余热利用率达66.7%。

### 参 考 文 献

- (1) ガスタービン用廢熱ボイラ エネルギー資源. 1986,7(4)
- (2) Waste heat boiler design two rules. Inter power generation,1980,3(6)
- (3) Evaluate the performance of waste heat boilers.Chem Eng,1981,88
- (4) Program calculate HRSG temperature profile steam flow.Power Eng,1987,91(9)
- (5) Size or check waste heat boilers quickly. Hydr Processing,1984,63(9)
- (6) Waste heat boiler design for PAKA gas turbine combined cycle station.modern power syst,1983,3 (3)
- (7) Design of a heat-recovery steam generation. modern power syst,1984,4(10)
- (8) HRSG for gas turbine applications. Hydr processing,1987 66(8)
- (9) Thermal and economic considerations in the design of gas turbine heat recovery systems.1982

(渠源沥 编辑)

### 热能动力工程杂志被评为优秀期刊

黑龙江省科学技术协会和黑龙江省科技期刊编辑学会于1989年3月4日召开了优秀期刊评选会。会上，评委们对全省的科技期刊进行了评比，评委们认为《热能动力工程》杂志的学术水平、编辑水平较高；版面设计、出版质量较好；读者反馈信息丰富；社会经济效益较高。授予了《热能动力工程》杂志“优秀期刊”的称号。