

# 热工状态给定的立式钢管空气预热器设计

洪祖炎 范志明 李立

(杭州锅炉厂)

〔摘要〕 讨论经济性要求对立式钢管空气预热器设计的影响, 导出结构设计公式。算法通常用作锅炉系统热力设计计算的子过程。当热工状态可由锅炉设计参数直接确定时, 本算法就是空气预热器设计计算全过程。

关键词 空气预热器 设计

## 1 前言

与锅炉其他受热面不同, 空气预热器受热面两侧工质放热系数处于同一数量级。因此, 一个经济、合理的设计, 必须考虑使空气、烟气速度比  $W_k/W$ , 处于某一合理范围。本文提出的公式反映了空气预热器设计的经济性要求。

在热工状态给定的条件下, 结合确定锅炉换热系统受热面工质状态参数解的热分配算法, 对其它热面设计也有普遍意义。意义在于这种对锅炉系统的热力设计计算法, 可使具体热面的结构变量和系统的热工变量相分离。也即是系统角度求解热工变量, 从局部热面进行结构设计。从而把一个复杂的系统设计问题, 有机地区分为若干个比较简单的设计计算子问题。

## 2 立式钢管空气预热器

### 几何关系

$$z_1 = a/S_1 - 1 \quad (1)$$

$$z_2 = (b - b_0)/N_K S_2 - 1 \quad (2)$$

式中,  $z_1, z_2$ ——管束横、纵向排数

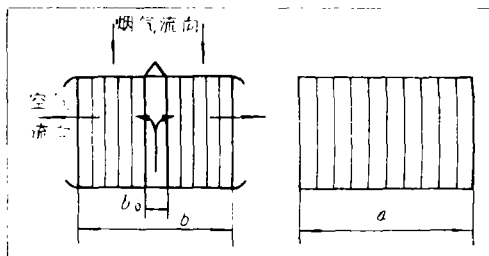


图1 立式钢管空气预热器示意图

$a$ —烟道宽度  $b$ —烟道深度  $b_0$ —风道深度

$S_1, S_2$ ——管束横、纵向节距

$N_K$ ——进风方式因子,

单侧进风:  $N_K = 1, b_0 = 0$

双侧进风:  $N_K = 2, b_0 > 0$

不失一般性, 令  $z_2$  为奇数,  $n_2$  为整数,

则

$$z_2 = 2n_2 - 1 \quad (3)$$

$$n_2 = (b - b_0)/2N_K S_2 \quad (4)$$

烟气流总管数

$$n = N_K [(2z_1 - 1)(n_2 - 1) + z_1] \quad (5)$$

式(1)、(4)代入式(5)得

$$n = [(2a - 3S_1)(b - b_0)]/2S_1 S_2 + N_K(2 - a/S_1) \quad (6)$$

如图2, 文献[1]建议, 若使横向管间隙

$S_1 - d_w = 2c$ , 空气侧流阻较小。则有

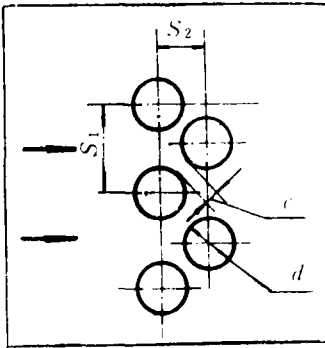


图2 管束布置示意图

$$\sigma_2 = (1 + 2\sigma_1)^{1/2} \quad (7)$$

烟气、空气流通面积  $F_y$ 、 $F_K$  和传热面积为

$$F_y = n\pi d_n^2/4 \quad (8)$$

$$F_K = (S_1 - d_w)(z_1 + 1)N_K L/M \quad (9)$$

$$H = \pi d_{cp} n L \quad (10)$$

式中,  $d_n$ 、 $d_w$ 、 $d_{cp}$  分别是管子内、外径和平均直径,  $L$ 、 $M$  为管子长度及空气流程数。

### 3 给定热工状态的空气预热器设计定理

**【引理】** 热工状态已知的空气预热器传热系数  $K$  关于烟气、空气速度的偏导数

$$\frac{\partial K}{\partial W_y} = K \frac{\gamma_y \alpha_2 (\alpha_1 - \alpha_f)}{\alpha_1 (\alpha_1 + \alpha_2) W_y} \quad (11)$$

$$\frac{\partial K}{\partial W_K} = K \frac{\gamma_K \alpha_1}{(\alpha_1 + \alpha_2) W_K} \quad (12)$$

式中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  是烟、空气放热系数,  $\alpha_f$  为烟气辐射放热系数,  $\gamma_K = 0.6$ ,  $\gamma_y = 0.8$ 。

**【定理】** 给定热工状态的空气预热器设计,

1. 结构变量  $\sigma_1$ 、 $\eta$  满足方程:

$$f(W_K, W_y, \sigma_1) = W_K W_y (1 - 1/\sigma_1) - C^* \eta K = 0 \quad (13)$$

其中,  $\eta = M \Delta t / N_K$  (14)

$\Delta t$ ——对流温压

2. 当  $\eta$  为常数时, 函数  $f(W_K, W_y,$

$\sigma_1)$  关于变量的偏导数恒大于零。

证1: 设

$$C_K = B_i V_0 (\beta'' + \Delta\alpha/2) (1 + t_K/273) / 3600 \quad (15)$$

$$C_y = \frac{B_i V_y}{900 \pi d_n^2} (1 + t_y/273) \quad (16)$$

$B_i$ ——燃料计算耗量

$V_0$ 、 $V_y$ ——理论空气量和烟气体积

$\Delta\alpha$ ——空气预热器漏风系数

$t_y$ 、 $t_K$ ——烟气、空气平均温度

$\beta''$ ——出口空气量和理论空气量比值

则  $W_K = C_K / F_K$  (17)

$$W_y = C_y / n \quad (18)$$

由式 (10) 代入传热方程

$$Q_{ph} = H K \Delta t / B_i \quad (19)$$

求得  $L = \frac{B_i Q_{ph} W_y}{\pi d_{cp} C_y K \Delta t}$  (20)

式中,  $Q_{ph}$  由热平衡方程决定, 热工状态给定时为常数。

$$\text{令 } C^* = \frac{C_y C_K \pi d_{cp}}{a B_i Q_{ph}} \quad (21)$$

且把式 (1)、(9)、(20)、(21) 代入式 (17) 即证。

证2: 由式 (13),  $\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} = \frac{W_K W_y}{\sigma_1^2} > 0$

$$\frac{\partial f}{\partial W_K} = \frac{C^* \eta K}{W_K} \left( 1 - \frac{W_K}{K} \frac{\partial K}{\partial W_K} \right)$$

引理公式 (12) 代入,

$$\frac{\partial f}{\partial W_K} = \frac{C^* \eta K}{W_K} \left( 1 - \frac{\gamma_K \alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \right) > 0$$

同理可证,

$$\frac{\partial f}{\partial W_y} = \frac{C^* \eta K}{W_y} \left[ 1 - \frac{\gamma_y (\alpha_1 - \alpha_f) \alpha_2}{\alpha_1 (\alpha_1 + \alpha_2)} \right] > 0$$

**【推论一】** 当设计变量  $\eta = M \Delta t / N_K$  及空气、烟气体积比  $\beta = W_K / W_y$  为常数时, 横向相对节距  $\sigma_1$  是烟速  $W_y$  的单调减函数。

证: 由定理, 式 (13) 关于  $W_y$  求导数解得

$$\frac{d\sigma_1}{dW_y} = - \frac{\partial f / \partial W_y + \beta \partial f / \partial W_K}{\partial f / \partial \sigma_1} < 0$$

特别是，当  $W_a \leq W_y \leq W_b$  时，可得下式。

$$\left(1 - \frac{\eta K C^*}{\beta W_b^2}\right)^{-1} \leq \sigma_1 \leq \left(1 - \frac{\eta K C^*}{\beta W_a^2}\right)^{-1} \quad (22)$$

**【推论二】** 空气预热器当设计变量  $\eta$  及  $b^* = b - b_0$  为常数时，定有： $W_y$  是  $\sigma_1$  的单调增函数； $W_K$ 、 $\beta$  是  $\sigma_1$  单调减函数。

证：式 (5) 关于  $\sigma_1$  求导

$$\frac{d\eta}{d\sigma_1} = - N_K \left[ (2n_2 - 1) \frac{z_1 + 1}{\sigma_1} + \frac{(2z_1 - 1)n_2}{4\sigma_2^2} \right] < 0$$

代入式 (17) 关于  $\sigma_1$  的导数表达式可证得

$$\frac{dW_y}{d\sigma_1} = - \frac{C_y}{n^2} \frac{d\eta}{d\sigma_1} > 0$$

定理式 (13) 关于  $\sigma_1$  求导数

$$\frac{dW_K}{d\sigma_1} = - \left( \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial W_y} \frac{dW_y}{d\sigma_1} \right) / \frac{\partial f}{\partial W_K} < 0$$

$$\frac{d\beta}{d\sigma_1} = \left( \frac{dW_K}{d\sigma_1} - \beta \frac{dW_y}{d\sigma_1} \right) / W_y < 0$$

特别是，当  $\beta_a \leq \beta \leq \beta_b$  时，可得下式：

$$\left[ 1 - \frac{\eta K C^*}{\beta_b W_y^2(\beta_b)} \right]^{-1} \leq \sigma_1 \leq \left[ 1 - \frac{\eta K C^*}{\beta_a W_y^2(\beta_a)} \right]^{-1} \quad (23)$$

式中， $W_y(\beta_a)$ 、 $W_y(\beta_b)$  是相应于  $\beta_a$ 、 $\beta_b$  的烟速。

### 4 空气预热器的设计计算

涉及空气预热器的结构变量集为  $\{d_w, d_n, \sigma_1, b, b_0, a, N_K, M\}$ 。当管径、烟道宽度和热工状态给定，并注意到第 3 节结构变量参数  $\eta$ 、 $b^*$  定义，则设计独立结构变量集缩减为  $\{\sigma_1, \eta, b^*\}$ 。

当满足条件

$$\beta_a \leq \beta \leq \beta_b \quad (24)$$

$$W_a \leq W_y \leq W_b \quad (25)$$

$$\sigma_a \leq \sigma_1 \leq \sigma_b \quad (26)$$

$$\beta W_y^2(1 - 1/\sigma_1) - \eta K C^* = 0 \quad (27)$$

此时，设计变量  $\eta$ 、 $\sigma_1$ 、 $b^*$  为设计允许解。

设式 (24) ~ (27) 的允许解集非空，则据上节定理推论一可得  $\eta$  值域，

$$\begin{cases} \eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max} \\ \eta_{\min} = \frac{\beta_b W_a^2 (1 - 1/\sigma_a)}{C^* K(\beta_b, W_a)} \\ \eta_{\max} = \frac{\beta_a W_b^2 (1 - 1/\sigma_b)}{C^* K(\beta_a, W_b)} \end{cases} \quad (28)$$

对满足上式的  $\eta$ ，调整约束式 (26)

$$\begin{cases} \sigma_a' \leq \sigma_1 \leq \sigma_b' \\ \sigma_a' = \max \left\{ \left[ 1 - \frac{\eta K C^*}{\beta_a W_b^2} \right]^{-1}, \sigma_a \right\} \\ \sigma_b' = \min \left\{ \left[ 1 - \frac{\eta K C^*}{\beta_b W_a^2} \right]^{-1}, \sigma_b \right\} \end{cases} \quad (29)$$

据推论一，设  $W_a'$ 、 $W_b'$  为相应于  $\sigma_b'$ 、 $\sigma_a'$  的烟速，则约束式 (25) 改写为

$$W_a' \leq W_y \leq W_b' \quad (25')$$

式中，

$$W_a' = \begin{cases} W_a & \sigma_b' < \sigma_b \\ \left[ \frac{C^* \eta K(\beta_b, W_a')}{\beta_b (1 - 1/\sigma_b)} \right]^{1/2} & \sigma_b' = \sigma_b \end{cases} \quad (30)$$

$$W_b' = \begin{cases} W_b & \sigma_a' > \sigma_a \\ \left[ \frac{C^* \eta K(\beta_a, W_b')}{\beta_a (1 - 1/\sigma_a)} \right]^{1/2} & \sigma_a' = \sigma_a \end{cases} \quad (31)$$

式 (30)、(31) 第二式由叠代格式求得：

$$W_y^i = \left[ \frac{C^* \eta K(\beta, W^{i-1}_y)}{\beta (1 - 1/\sigma_1)} \right]^{1/2}$$

注意到式 (6)、(18)，且令

$$b^* = b^*(W_y, \sigma_1) = \frac{2S_1 S_2}{2a - 3S_1} [C_y / W_y - N_K (2 - a/S_1)] \quad (32)$$

则  $b^*$  的值域为

$$b^*(W_b', \sigma_a') \leq b^* \leq b^*(W_a', \sigma_b') \quad (33)$$

利用定理推论二的式(23), 下式成立,

$$\begin{cases} \sigma_a'' \leq \sigma_1 \leq \sigma_b'' \\ \sigma_a'' = \left[ 1 - \frac{\eta K C^*}{\beta_b W_y'^2(\beta_b)} \right]^{-1} \\ \sigma_b'' = \left[ 1 - \frac{\eta K C^*}{\beta_a W_y'^2(\beta_a)} \right]^{-1} \end{cases} \quad (34)$$

式中,  $\sigma_a''$ 、 $\sigma_b''$ 可按下述叠代格式求解:

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\beta_i - \beta_{i-1}}(\beta_0 - \beta_{i-1}) \quad (35)$$

叠代过程中的每一  $\sigma_{i+1}$ , 依次由式(6)、(18)算出  $W_y^{i+1}$ 后, 再按下列格式计算

$$W_k^i = \frac{C^* \eta K (W_k^{i-1}, W_y^{i+1})}{W^{i+1}(1 - 1/\sigma_{i+1})} \quad (36)$$

若式(35)、(36)收敛解为  $\sigma_r$ ,  $W^{i+1}_k$ ,

$$\text{则 } \beta_{i+1} = W_k^{i+1} / W^{i+1}_y \quad (37)$$

表 1

|     | $t_y'$ | $t_y''$ | $t_k'$ | $t_k''$ | $Q_{ph}$ | $C^*$   | $C_y$   | $C_k$ |
|-----|--------|---------|--------|---------|----------|---------|---------|-------|
| 上 级 | 399.6  | 319.2   | 224    | 322.9   | 217.3    | 0.034 8 | 130 644 | 104.2 |
| 下 级 | 290.0  | 133.1   | 30     | 224     | 439.3    | 0.010 2 | 105 683 | 76.6  |

式(24)~(27)中, 取  $W_a = 9 \text{ m/s}$ ,  $W_b = 14 \text{ m/s}$ ,  $\beta_a = 0.45$ ,  $\beta_b = 0.55$ ,  $\sigma_a = 1.4$ ,  $\sigma_b = 1.8$ 。据式(28)计算  $\eta_{min}$ ,  $\eta_{max}$ ,

表 2

|     | $M$ | $N_k$ | $\Delta t$ | $\sigma_a'$ | $\sigma_b'$ | $W_{a'}$ | $W_{b'}$ | $\eta_{min}$ | $\eta_{max}$ | $b_{min}^*$ | $b_{max}^*$ |
|-----|-----|-------|------------|-------------|-------------|----------|----------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 上 级 | 1   | 2     | 76         | 1.4         | 1.71        | 9        | 13.6     | 26.1         | 62.6         | 3.17        | 4.74        |
| 下 级 | 3   | 2     | 78.5       | 1.4         | 1.61        | 9        | 13.3     | 88.8         | 201.5        | 2.62        | 3.85        |

由表2可知, 若使两级空气预热器烟道截面尺寸一致,  $b^*$ 取值范围只能是  $b^* = 3.17 \sim 3.85 \text{ m}$ 。

表 3

|       |     | $\sigma_a''$ | $\sigma_b''$ | $\sigma_{min}$ | $\sigma_{max}$ | $S_{min}'$ | $S_{max}'$ | $b^*$ |
|-------|-----|--------------|--------------|----------------|----------------|------------|------------|-------|
| 方 案 一 | 上 级 | 1.45         | 1.51         | 1.45           | 1.51           | 58         | 60.4       | 3.6   |
|       | 下 级 | 1.54         | 1.61         | 1.54           | 1.61           | 61.6       | 64.4       | 3.6   |
| 方 案 二 | 上 级 | 1.48         | 1.54         | 1.48           | 1.54           | 59.2       | 61.6       | 3.8   |
|       | 下 级 | 1.57         | 1.65         | 1.57           | 1.61           | 62.8       | 64.4       | 3.8   |

$$\sigma_r = \begin{cases} \sigma_a'' & \beta_0 \leq \beta_b \\ \sigma_b'' & \beta_0 = \beta_a \end{cases} \quad (38)$$

最后, 由式(29)、(34)确定  $\sigma_1$  的值为

$$\begin{cases} \sigma_{min} \leq \sigma_1 \leq \sigma_{max} \\ \sigma_{min} \leq \max\{\sigma_a', \sigma_a''\} \\ \sigma_{max} = \min\{\sigma_b', \sigma_b''\} \end{cases} \quad (39)$$

由本算法过程可见, 依次按公式(28)、(33)、(39)选取的设计变量  $\eta$ 、 $b^*$ 、 $\sigma_1$ 一定是约束集(24)~(27)的设计允许解。

### 5 空气预热器设计实例和讨论

某台220 t/h煤粉炉, 尾部烟道尺寸  $a = 7.57 \text{ m}$ ,  $b = 5.15 \text{ m}$ , 管子  $\phi 40 \times 1.5$ , 计算燃料耗量  $B_i = 27 639 \text{ kg/h}$ 。热力计算得到上、下两级空气预热器的热工状态参数如下表。

按式(14)求得满足式(28)的  $\eta_{上} = 38$ ,  $\eta_{下} = 117.6$ 。再由式(33)算  $b^*$  限值, 计算结果列于表2。

不失一般性, 取  $b^* = 3.6, 3.8 \text{ m}$ , 相应的  $b_0 = 1.55, 1.35 \text{ m}$ 。利用式(34)~(39), 可得表3。

文献[1]推荐管节距 (下表)

|       |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|----|----|
| $S_1$ | 60 | 64 | 68 | 72 | 77 | 82 |
| $S_2$ | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |

结合表3横向节距 $S_1$ 的限值,可取节距设计值:上级 $S_1 = 60 \text{ mm}$ , $S_2 = 40 \text{ mm}$ ; 下级 $S_1 = 64 \text{ mm}$ , $S_2 = 41 \text{ mm}$ 。两个方案的设计值列于表4。

表 4

|       | $b^*$  | $S_1$ | $S_2$ | $z_1$ | $z_2$ | $n$    | $L_{op}$ | $W_y$ | $W_k$ | $\beta$ | $K$   | $H$   |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 方 案 一 | 上级 3.6 | 60    | 40    | 125   | 44    | 10 957 | 3.78     | 11.9  | 5.46  | 0.458   | 16.41 | 4 815 |
|       | 下级 3.6 | 64    | 41    | 117   | 42    | 9 787  | 8.35     | 10.8  | 4.85  | 0.449   | 16.32 | 9 503 |
| 方 案 二 | 上级 3.8 | 60    | 40    | 125   | 46    | 11 455 | 3.66     | 11.4  | 5.64  | 0.494   | 16.21 | 4 874 |
|       | 下级 3.8 | 64    | 41    | 117   | 45    | 10 486 | 7.98     | 10.1  | 5.07  | 0.503   | 15.94 | 9 731 |

从表4可见,两个方案都是满足约束式(24)~(27)的设计允许解。当 $b^*$ 减小时, $W_y$ 、 $K$ 、 $L_{op}$ 增大,受热面积 $H$ 减少。由此得出结论,在尾部烟道高度允许前提下,选取较小 $b^*$ 的方案,可以节省受热面。

原设计中 $b^* = 3.8 \text{ m}$ ,上级空气预热器 $\beta = 0.538$ ,满足经济性条件。但下级 $\beta = 0.767$ ,违背了经济性条件。问题在于节距选用不当( $S_1 = 60 \text{ mm}$ , $S_2 = 40 \text{ mm}$ ),只

有按表4选取 $S_1 = 64 \text{ mm}$ , $S_2 = 41 \text{ mm}$ ,才能使下级设计也是经济合理的。

上述计算实例说明本文推荐的设计方法可行和实用。设计人员可以根据具体情况,从多方案中挑选合理的设计方案。有关计算公式,即使手算也能完成。

参 考 文 献

- 1 清华大学电力工程系锅炉教研组. 锅炉原理及计算. 北京: 科学出版社, 1979

## The Design of Vertical Type Steel Tube Air Preheater Under Given Thermotechnical Conditions

Hong Zuyan, Fan Zhiming, Li Li

(Hangzhou Boiler Works)

Abstract

The effect of economics on the design of vertical type steel tube air preheater is discussed with the structural design formula being given. The calculation method introduced in this paper is usually used as the sub-procedure of a boiler system thermal design calculation. The present method constitutes a whole calculation process of air preheater design in case the thermotechnical conditions can be directly determined by boiler design parameters.

Key words: air preheater, design