

# 关于烟气余热回收节能的研究与计算

以 10h/t 燃煤链条热水锅炉为例，发热量为 7MW，燃煤品质为 4500 Kcal/kg。现排烟温度为 200℃，预计将烟温降至 150℃，求安装省煤器后的节能效果。

## 1. 每小时燃煤量计算

$$B_0 = \frac{Q \cdot t}{q \cdot \eta} = \frac{7 \times 10^6 W \times 3600 s / h}{4500 (Kcal / kg) \times 4186 (J / Kcal) \cdot 70\%} = 1911 kg / h \quad (1)$$

其中，

$B_0$ —— 每小时耗煤量，kg/h

$Q$ —— 锅炉发热量，MW

$q$ —— 燃煤发热值，Kcal/kg

$\eta$ —— 锅炉热效率，%

## 2. 空气需求量计算

按照常规，4500 Kcal/kg 品质燃煤组分按照如下计算：C 占 60，H 占 5，O 占 1，N 占 1，S 占 0.7，A 占 23.3，M 占 10。

按照常规，燃煤锅炉空气过剩系数  $\alpha = 1.18$

每 kg 理论空气需求量计算：

$$L_0 = (8.89C + 26.66H + 3.33S - 3.33O) \times 10^{-2} \quad (m^3 / kg) \quad (2)$$

$$L_0 = (8.89 \times 60 + 26.66 \times 5 + 3.33 \times 0.7 - 3.33 \times 1) \times 10^{-2} = 6.657 m^3 / kg$$

以燃烧 1911 kg 煤为例，计算理论空气需求量：

$$\begin{aligned} L'_0 &= (8.89C + 26.66H + 3.33S - 3.33O) \times 10^{-2} \times 1911 \\ &= (8.89 \times 60 + 26.66 \times 5 + 3.33 \times 0.7 - 3.33 \times 1) \times 10^{-2} \times 1911 \\ &= 12721 m^3 \end{aligned}$$

每 kg 实际空气供给量计算:

$$L_{\alpha} = \alpha L_0 \quad (m^3 / kg) \quad (3)$$

$$L_{\alpha} = \alpha L_0 = 1.18 \times 6.657 = 7.86 m^3 / kg$$

以燃烧 1911 kg 煤为例, 计算实际空气需求量:

$$L_{\alpha}' = \alpha L_0' = 1.18 \times 12721 = 15010 m^3$$

### 3. 烟气量计算

每 kg 煤理论燃烧产物生成量计算:

$$V_0 = \left( \frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{H}{2} + \frac{N}{28} + \frac{M}{18} \right) \frac{22.4}{100} + \frac{79}{100} L_0 \quad (m^3 / kg) \quad (4)$$

$$V_0 = \left( \frac{60}{12} + \frac{0.7}{32} + \frac{5}{2} + \frac{1}{28} + \frac{10}{18} \right) \frac{22.4}{100} + \frac{79}{100} \times 6.657 = 7.076 m^3 / kg$$

按照 1911 kg 煤计算, 计算理论燃烧产物生成量:

$$V_0' = V_0 \cdot 1911 = 13522 m^3$$

每 kg 实际燃烧产物生成量计算:

$$V_{\alpha} = \left( \frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{H}{2} + \frac{N}{28} + \frac{M}{18} \right) \frac{22.4}{100} + \left( n - \frac{21}{100} \right) L_0 \quad (m^3 / kg) \quad (5)$$

$$V_{\alpha} = \left( \frac{60}{12} + \frac{0.7}{32} + \frac{5}{2} + \frac{1}{28} + \frac{10}{18} \right) \frac{22.4}{100} + \left( 1.18 - \frac{21}{100} \right) \times 6.657 = 8.275 m^3 / kg$$

按照 1911 kg 煤计算, 计算实际燃烧产物生成量:

$$V_{\alpha}' = V_{\alpha} \cdot 1911 = 15813 m^3$$

### 4. 燃烧产物成分计算

$$CO_2 \% = \frac{V_{CO_2}}{V_{\alpha}} \times 100\% = \frac{\frac{C_{ar}}{12} \times \frac{22.4}{100}}{V_{\alpha}} \times 100\% = \frac{\frac{60}{12} \times \frac{22.4}{100}}{8.275} \times 100\% = 13.53\%$$

$$SO_2 \% = \frac{V_{SO_2}}{V_{\alpha}} \times 100\% = \frac{\frac{S_{ar}}{32} \times \frac{22.4}{100}}{V_{\alpha}} \times 100\% = \frac{\frac{0.7}{32} \times \frac{22.4}{100}}{8.275} \times 100\% = 0.06\%$$

$$H_2O\% = \frac{V_{H_2O}}{V_\alpha} \times 100\% = \frac{(\frac{H_{ar}}{2} + \frac{M_{ar}}{18}) \times \frac{22.4}{100}}{V_\alpha} \times 100\% = \frac{(\frac{5}{2} + \frac{10}{18}) \times \frac{22.4}{100}}{8.275} \times 100\% = 8.27\%$$

$$N_2\% = \frac{V_{N_2}}{V_\alpha} \times 100\% = \frac{(\frac{N_{ar}}{28} \times \frac{22.4}{100}) + \frac{79}{100} L_\alpha}{V_\alpha} \times 100\% = \frac{(\frac{1}{28} \times \frac{22.4}{100}) + \frac{79}{100} \times 7.86}{8.275} \times 100\% = 75.13\%$$

$$O_2\% = \frac{V_{O_2}}{V_\alpha} \times 100\% = \frac{\frac{21}{100} (L_\alpha - L_0)}{V_\alpha} \times 100\% = \frac{\frac{21}{100} \times (7.86 - 6.66)}{8.275} \times 100\% = 3.05\% \quad (6)$$

$$CO_2\% + SO_2\% + N_2\% + O_2\% + H_2O\% = 13.53\% + 0.06\% + 8.27\% + 75.13\% + 3.05\% = 100.04\%$$

$$\text{烟气组分误差 } \Delta = \frac{100.04\% - 100\%}{100\%} \times 100\% = 0.4\%, \text{ 可忽略不计。}$$

## 5. 烟气节能量计算

按照烟气温度从 200℃ 降至 150℃ 计算。

在 150℃ 以及 200℃ 时，烟气各组分热焓值  $h$  和密度  $\rho$ ：

$$CO_2: \quad h_{CO_2}' = 619.2838 KJ / kg, \rho_{CO_2}' = 1.2527 kg / m^3 \quad (7)$$

$$h_{CO_2}'' = 668.2286 KJ / kg, \rho_{CO_2}'' = 1.1198 kg / m^3$$

$$SO_2: \quad h_{SO_2}' = 496.2033 KJ / kg, \rho_{SO_2}' = 1.8295 kg / m^3$$

$$h_{SO_2}'' = 531.5427 KJ / kg, \rho_{SO_2}'' = 1.6336 kg / m^3$$

$$N_2: \quad h_{N_2}' = 439.6651 KJ / kg, \rho_{N_2}' = 0.796 kg / m^3$$

$$h_{N_2}'' = 492.1415 KJ / kg, \rho_{N_2}'' = 0.7118 kg / m^3$$

$$O_2: \quad h_{O_2}' = 387.5521 KJ / kg, \rho_{O_2}' = 0.9095 kg / m^3$$

$$h_{O_2}'' = 435.3463 KJ / kg, \rho_{O_2}'' = 0.8133 kg / m^3$$

$$H_2O: \quad h_{H_2O}' = 2776.6026 KJ / kg, \rho_{H_2O}' = 0.5164 kg / m^3$$

$$h_{H_2O}'' = 2875.4507 KJ / kg, \rho_{H_2O}'' = 0.4603 kg / m^3$$

$$\text{根据理想气体状态方程式: } pV = nRT \quad (8)$$

由 (8) 可知，在恒压、恒物质的量情况下  $\rho T = C$ ，即温度与密

度成反比关系。

进入风机的烟气温度是 150℃，进入省煤器的烟气温度是 200℃，安装省煤器后，烟气温度降低，密度增大，相同物质的量烟气的密度增大，体积减小。为了保证不影响原锅炉炉膛内烟气流量及温度变化，需维持原空气过剩系数不变，风机风量应减小，引风机的频率应适当降低，否则若按原风量引风会使空气过剩系数增大，降低了炉膛温度，增大了烟气热损失，同时也增加了鼓引风机工作负荷。

烟气密度计算公式为：

$$\rho_{yq}' = \rho_{CO_2}' \cdot CO_2\% + \rho_{SO_2}' \cdot SO_2\% + \rho_{N_2}' \cdot N_2\% + \rho_{O_2}' \cdot O_2\% + \rho_{H_2O}' \cdot H_2O\% \quad (9)$$

因此，将 (6)、(7) 代入 (9) 后，可知烟气在 150℃ 时，密度为

$$\begin{aligned} \rho_{yq}' &= \rho_{CO_2}' \cdot CO_2\% + \rho_{SO_2}' \cdot SO_2\% + \rho_{N_2}' \cdot N_2\% + \rho_{O_2}' \cdot O_2\% + \rho_{H_2O}' \cdot H_2O\% \\ &= 1.2527 \times 13.53\% + 1.8295 \times 0.6\% + 0.796 \times 75.13\% + 0.9095 \times 3.05\% + 0.5164 \times 8.27\% \\ &= 0.848948 \text{ kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

在 200℃ 时，密度为

$$\begin{aligned} \rho_{yq}'' &= \rho_{CO_2}'' \cdot CO_2\% + \rho_{SO_2}'' \cdot SO_2\% + \rho_{N_2}'' \cdot N_2\% + \rho_{O_2}'' \cdot O_2\% + \rho_{H_2O}'' \cdot H_2O\% \\ &= 1.1198 \times 13.53\% + 1.6383 \times 0.6\% + 0.7118 \times 75.13\% + 0.8133 \times 3.05\% + 0.4603 \times 8.27\% \\ &= 0.758958 \text{ kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

由 (8) 可知，恒压、恒物质的量情况下， $V \propto T$ ，设 150℃ 时烟气体积为  $V'$ ，200℃ 时烟气体积为  $V''$ ，所以可得 150℃ 烟气体积为

$$V' = \frac{V'' \cdot (273.13 + t')}{273.13 + t''} = \frac{V'' \cdot (273.13 + 150)}{273.13 + 200} = 0.8943V'' \quad (10)$$

$$\text{其中 } V'' = V_a' \quad (11)$$

由此可知，排烟温度从 200℃ 降低至 150℃ 时，节能量为

$$\begin{aligned}
Q_2 &= h''V'' - h'V' \\
&= (h_{CO_2}'' \cdot \rho_{CO_2}'' \cdot CO_2\% + h_{SO_2}'' \cdot \rho_{SO_2}'' \cdot SO_2\% + \\
&h_{N_2}'' \cdot \rho_{N_2}'' \cdot N_2\% + h_{O_2}'' \cdot \rho_{O_2}'' \cdot O_2\% + h_{H_2O}'' \cdot \rho_{H_2O}'' \cdot H_2O\%) \cdot V'' \\
&\quad - (h_{CO_2}' \cdot \rho_{CO_2}' \cdot CO_2\% + h_{SO_2}' \cdot \rho_{SO_2}' \cdot SO_2\% + \\
&h_{N_2}' \cdot \rho_{N_2}' \cdot N_2\% + h_{O_2}' \cdot \rho_{O_2}' \cdot O_2\% + h_{H_2O}' \cdot \rho_{H_2O}' \cdot H_2O\%) \cdot V'
\end{aligned} \tag{12}$$

将 (7)、(10)、(11) 代入 (12)，得

$$Q_2 = h''V'' - h'V' = 9069444.596 - 7900304.221 = 1169140.375 \text{ KJ}$$

折合节约 4500 Kcal 燃煤量：

$$m = \frac{Q_2}{q} = \frac{1169140.375 \text{ KJ}}{4500(\text{Kcal} / \text{kg}) \times 4.186(\text{KJ} / \text{Kcal})} = 62.067 \text{ kg}$$

安装省煤器后节煤率为：

$$\beta = \frac{m}{B_0} \times 100\% = \frac{62.067 \text{ kg}}{1911 \text{ kg}} \times 100\% = 3.24\%$$

安装省煤器后，锅炉净效率为：

$$\eta' = \frac{Q}{(B_0 - m) \cdot q} = \frac{7 \times 10^6 \text{ W} \times 3600 \text{ s} / \text{h}}{(1911 - 62.067) \text{ kg} / \text{h} \times 4500 \text{ Kcal} / \text{kg} \times 4186 \text{ J} / \text{Kcal}} = 72.35\%$$

锅炉净效率提高  $\Delta\eta = \eta' - \eta = 72.35\% - 70\% = 2.35\%$

计算基础：1.煤炭粒度要求 0~3mm 不超过 10%，3~6mm 不超过 20%，6~25mm 不低于 65%，40mm 不超过 10%；2.安装省煤器前后空气剩余系数  $\alpha$  不变；3.省煤器换热过程近似认为恒压过程，且烟气泄露忽略不计；4.锅炉本体设计排烟温度为 200℃；5.煤质稳定。

其中，煤炭粒度与空气剩余系数对安装省煤器后锅炉净效率的提高影响最大。

结论：在理想状态下，安装烟气余热回收设备，温降 50℃ 情况下，节煤率为 3.24%，锅炉净效率提高 2.35%。