

1080t/h锅炉燃烧系统设计

摘要

1080t/h 锅炉燃烧系统的毕业设计主要为炉膛燃烧系统的设计。在炉膛燃烧系统的设计中，要对炉膛、燃烧器及屏式过热器进行设计计算和热力计算。对燃烧系统进行初步的经济性分析，炉膛的设计要从燃料的选择开始，炉膛必须能适合燃料燃烧的要求，使燃料充分的燃烧；屏式过热器布置在锅炉炉膛的上方，过热器吸收了炉膛必需的辐射传热量和对流传热量，并把炉膛出口烟气温度限制在合理范围内，设计要充分发挥烟气流的偏移能起到阻尼和导流作用。

前言

锅炉燃烧设备是组织燃料安全经济地燃烧的生产装置。我国发电厂大型锅炉主要是固态排渣煤粉炉。毕业设计是对煤粉燃烧器及炉膛的结构、原理、特点进行分析设计，通过一系列的计算来证明煤粉燃烧器及炉膛的合理性及经济性。

锅炉使用的燃料以煤和油为主，近年来因世界油价猛涨，燃煤锅炉的比例有所增加。世界各国包括我国在内，为了加快火电厂建设速度，降低火电厂每千瓦设备费用、基建投资、金属耗量、运行管理费用，提高机组的经济性，节约燃料，电厂锅炉总的趋势是向大容量、高参数的方向发展。

毕业设计的主要内容包煤种的选择、锅炉结构的设计、锅炉燃烧系统的热力计算。

目录

| | |
|-------------------------------|----|
| 1080T/H 锅炉燃烧系统设计 摘要 | 1 |
| 前言 | 1 |
| 第一章 燃烧产物和燃烧热平衡计算 | 4 |
| 1. 1 煤质分析 | 4 |
| 1. 1. 1、燃料的选用 | 4 |
| 1. 1. 2、成分分析 | 5 |
| 1. 2 燃料消耗量计算及热平衡 | 5 |
| 1. 2. 1、燃料计算: | 6 |
| 1. 2. 2、锅炉的有效输入热量及各项热损失 | 8 |
| 1. 2. 3、锅炉的热平衡 | 11 |
| 第二章 炉膛设计 | 12 |
| 2. 1 炉膛结构设计 | 12 |
| 2. 1. 1、炉膛结构设计（带前屏过热器）: | 12 |
| 2. 1. 2、水冷壁的设计 | 17 |
| 2. 2 燃烧器的结构设计 | 18 |
| 2. 2. 1、燃烧器的设计 | 19 |
| 2. 2. 2、燃烧器结构尺寸计算 | 19 |
| 2. 3 炉膛和前屏过热器结构尺寸计算 | 22 |
| 2. 3. 1、炉膛结构尺寸计算 | 22 |
| 2. 3. 2、前屏过热器结构尺寸计算 | 26 |
| 第三章 炉膛及后屏热力计算 | 28 |
| 3. 1 炉膛热力计算 | 28 |
| 3. 1. 1、炉膛的热力计算 | 28 |
| 3. 2 后屏过热器热力计算 | 35 |
| 3. 2. 1、后屏过热器结构尺寸计算 | 36 |
| 3. 2. 2、后屏过热器的热力计算 | 38 |

| | |
|-------------------------|----|
| 附录一 | 44 |
| 附表一 燃料消耗量计算及热平衡用表 | 44 |
| 附表二 炉膛设计用表 | 47 |
| 附录二 | 50 |
| 致谢 | 51 |
| 参考文献 | 52 |

第一章 燃烧产物和燃烧热平衡计算

燃烧产物和燃烧热平衡计算的任务是确定燃料完全燃烧时所需的空气量、燃烧生成的烟气量和烟气焓等。燃烧产物和燃烧热平衡计算是进行锅炉设计、改造以及选择锅炉辅机的基础，也是正确进行锅炉经济运行调整的基础。

1. 1 煤质分析

燃料是锅炉的粮食。锅炉的安全运行的安全性、经济性与燃料的性质有密切的关系，锅炉的设计也只有在充分掌握燃料性质的基础上才能进行。因此，对于锅炉设计和工作运行人员来说，了解燃料的组成成分、性质及其对锅炉工作的影响就具有十分重要的意义。

1. 1. 1、燃料的选用

锅炉设计选用优质无烟煤其成分如下：

收到基水分： $M_{ar}=5.0\%$

干燥无灰基灰分： $A_d=26.0\%$

元素分析： $C_{daf}=91.7\%$

$H_{daf}=3.8\%$

$O_{daf}=2.2\%$

$N_{daf}=1.3\%$

$S_{daf}=1.0\%$

收到基低位发热量： $Q_{ar.net}=26377KJ/Kg$

干燥无灰基挥发分： $V_{daf}=9.0\%$

空气干燥基水分： $M_{ad}=1.0\%$

煤灰熔融性：

变形温度： $t_1=1400^{\circ}C$

软化温度： $t_2=1500^{\circ}C$

融化温度: $t_3 > 1500^\circ\text{C}$

1. 1. 2、成分分析

水分与灰分的含量常受外界影响而变化, 从而引起其它成分的质量百分含量也随之发生变化。因此要确切地反映煤的特性以及使各种煤的分析结果具有可比性, 就不仅需要知道煤的各种成分含量, 而且还需要知道各种成分含量的基准(即所处状态和条件)是什么。为了实际应用和理论研究的需要, 通常采用的基准有以下几种:

收到基 是包括全部水分和灰分在内的燃料成分总量作为标准。其计算公式为:

$$C_{\text{ar}}+H_{\text{ar}}+O_{\text{ar}}+N_{\text{ar}}+S_{\text{ar}}+A_{\text{ar}}+M_{\text{ar}}=100\% \quad (1-1)$$

空气干燥基 是以空气风干后的燃料成分总量作为计算标准。其计算公式为:

$$C_{\text{ad}}+H_{\text{ad}}+O_{\text{ad}}+N_{\text{ad}}+S_{\text{ad}}+A_{\text{ad}}+M_{\text{ad}}=100\% \quad (1-2)$$

干燥基 是以干燥的即除了全部水分以外的燃料成分总量作为计算标准。其计算公式为:

$$C_{\text{d}}+H_{\text{d}}+O_{\text{d}}+N_{\text{d}}+A_{\text{d}}+S_{\text{d}}+A_{\text{d}}=100\% \quad (1-3)$$

干燥无灰基 是以无水无灰的燃料成分总量作为计算标准。其计算公式为:

$$C_{\text{daf}}+H_{\text{daf}}+O_{\text{daf}}+N_{\text{daf}}+S_{\text{daf}}=100\% \quad (1-4)$$

则由(1-1), (1-2), (1-3), (1-4)可得所应用煤的应用基准如下:

$$C_{\text{ar}}=64.465\%$$

$$H_{\text{ar}}=2.671\%$$

$$O_{\text{ar}}=1.547\%$$

$$N_{\text{ar}}=0.914\%$$

$$S_{\text{ar}}=0.703\%$$

1. 2 燃料消耗量计算及热平衡

燃料燃烧是燃料中的可燃成分与空气中的氧气在高温的条件下所发生的强烈放热的

化学反应。因此燃料所需空气量可根据燃烧的化学反应关系进行计算。

1. 2. 1、燃料计算：

燃烧计算是计算燃料完全燃烧所需的理论干空气量、完全燃烧时的燃烧产物、燃烧产物的焓等。如下：

1、燃料完全燃烧所需的理论干空气量：

$$\begin{aligned} V^0 &= 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar} \\ &= 0.0889 \times (64.465 + 0.375 \times 0.703) + 0.265 \times 2.671 - 0.0333 \times 1.547 \\ &= 6.41 \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (1-5)$$

2、燃料完全燃烧时的燃烧产物：

在设计锅炉时，是根据完全燃烧时的化学反应关系来计算烟气容积的。为便于理解，一般先计算理论烟气容积，在此基础上再考虑过量空气容积和随同这部分过量空气带入的水蒸气容积，即可算出该烟气的（总）容积。

燃料在过量空气系数时，完全燃烧生成的氮气理论容积：

$$\begin{aligned} V^0_{N_2} &= 0.79V^0 + 0.8N_{ar}/100 \\ &= 0.79 \times 6.41 + 0.8 \times 0.914/100 \\ &= 5.507 \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (1-6)$$

三原子气体容积： $V_{RO_2} = 1.866 \times (C_{ar} + 0.375S_{ar})/100$

$$\begin{aligned} &= 1.866 \times (64.465 + 0.375 \times 0.703)/100 \\ &= 1.2078 \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (1-7)$$

水蒸气理论容积： $V^0_{H_2O} = 0.111H_{ar} + 0.0124M_{ar} + 0.016V^0$

$$\begin{aligned} &= 0.111 \times 2.671 + 0.0124 \times 5.0 + 0.016 \times 6.41 \\ &= 0.461 \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (1-8)$$

烟气容积： $V_y = V_{RO_2} + V^0_{N_2} + V^0_{H_2O} + (\alpha - 1)V^0$

$$\begin{aligned} &= 1.2078 + 5.057 + 0.461 + (1.20 - 1) \times 6.41 \\ &= 8.328 \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned} \quad (1-9)$$

α ——炉膛过量空气系数，一般煤粉炉 $\alpha = 1.15 \sim 1.25$ 。这里 $\alpha = 1.20$ 。

3、燃烧产物的焓：

设计锅炉时，由于不能测得烟气中各种气体成分的百分数，故按完全燃烧化学反应进行计算。

1kg 燃料的烟气热焓：

$$\begin{aligned} I &= I_y^0 + (\alpha - 1) + I_{fh} \\ &= 12755.148 + (1.20 - 1) \times 16503.186 + 485.8 \\ &= 17366.754 \text{kJ} / \text{kg} \end{aligned} \quad (1-10)$$

a、其中：

$$\begin{aligned} I_y^0 &= V_{RO_2}^0 (c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c\theta)_{H_2O} \\ &= 1.2078 \times 2717 + 5.057 \times 1697 + 0.461 \times 2132 \\ &= 12755.148 \text{kJ} / \text{kg} \end{aligned} \quad (1-11)$$

$(c\theta)_{CO_2}$ ——烟气中二氧化碳气体在 1200℃时的焓为 2717kJ/kg，由附表一，表 I 得。

$(c\theta)_{N_2}$ ——烟气中氮气在 1200℃时的焓为 1697kJ/kg，由附表一，表 I 得。

$(c\theta)_{H_2O}$ ——烟气中水蒸气在 1200℃时的焓为 2132kJ/kg，由附表一，表 I 得。

b、为标准状态下理论空气焓：

1 kg 固体或液体燃料燃烧所需理论空气量在定压下从 0℃加热到 θ ℃所需要的热量称为理论空气焓，单位为 kJ/kg。

$$\begin{aligned} I_k^0 &= V^0 (c\theta)_k \\ &= 6.41 \times 1753 \\ &= 11236.73 \text{kJ} / \text{kg} \end{aligned} \quad (1-12)$$

$(c\theta)_k$ ——干空气连同其带入的水蒸汽在 1200℃时的焓为 1753kJ/kg，由附表一，表 I 得。

c、烟气离开炉膛带走的飞灰折算量为： $A_{zs} = 1000 \alpha_{fh} A_{ar} / Q_{DW}^y$

$$\begin{aligned} &= 1000 \times 0.95 \times 24.7 / 26377 \\ &= 0.89 \end{aligned} \quad (1-13)$$

α_{fh} ——飞灰份额为 0.95，由附表一，表 II 查得。

$$\begin{aligned}
 \text{d、飞灰焓: } I_m &= (C \theta)_h \alpha_{fh} A_{ar} / 100 \\
 &= 1206 \times 24.7 / 100 \times 24.7 \times 0.95 \\
 &= 282.99 \text{kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{1-14}$$

1. 2. 2、锅炉的有效输入热量及各项热损失

对于锅炉的输入热量包括燃料应用基低位发热量、燃料的物理显热、外来热源加热空气时带入的热量和雾化燃油所用蒸汽带入热量。

1、锅炉的输入热量：

$$\begin{aligned}
 Q_r &= Q_{dw}^y + i_r + Q_{wr} + Q_{wh} \\
 &= 26377 + 21.68 + 0 + 0 \\
 &= 26398 \text{kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{1-15}$$

Q_{dw}^y —— 燃料应用基低位发热量

i_r —— 燃料的物理显热

Q_{wr} —— 雾化燃油所用蒸汽带入的热量

Q_{wh} —— 外来热源加热空气时带入的热量

a、燃料的物理显热

$$\begin{aligned}
 i_r &= C_r^y t_r \\
 &= 1.084 \times 20 \\
 &= 21.86 \text{kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{1-16}$$

C_r^y —— 燃料的应用基比热，固体燃料计算式为：

$$\begin{aligned}
 C_r^y &= C_r^g (100 - M_{ar}) / 100 + 4.19 M_{ar} / 100 \\
 &= 0.92 \times (100 - 5.0) / 100 + 4.19 \times 5.0 / 100 \\
 &= 1.084 \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{1-17}$$

t_r —— 燃料的温度，固体燃料可选 20℃。

C_r^g —— 燃料干燥基比热为 0.92 kJ/kg·℃

b、雾化燃油所用蒸汽带入的热量：

$$Q_{wr} = 0$$

c、外来热源加热空气时的热量

$$Q_{wh} = 0$$

2、锅炉有效利用热量

锅炉每小时的有效利用热量：

$$\begin{aligned} Q_g &= D_{gr}(h_{gr}'' - h_{gs}') + D_{zw}(h_{zr}'' - h_{zr}') + D_{pw}(h_{pw} - h_{gs}') \\ &= 1080 \times (3388.92 - 1736.35) + 834.11 \times (3540.56 - 3021.65) + 21.6 \times (2505.4 - 1736.35) \\ &= 2234215.1 \text{kJ/h} \end{aligned} \quad (1-18)$$

D_{gr} 、 D_{zw} 、 D_{pw} ——分别为过热蒸汽、再热蒸汽、排污水的流量^[1]：

$$D_{gr} = 1080 \text{t/h}$$

$$D_{zw} = 834.11 \text{t/h}$$

$$D_{pw} = D_{gr} \times 2\% = 21.6 \text{t/h}$$

h_{gr}'' 、 h_{gs}' 、 h_{zr}'' 、 h_{zr}' 、 h_{pw} ——分别为过热器出口蒸汽、锅炉给水、再热器出口、再热器入口以及排污水的焓^[2]。

$$h_{gr}'' = 3388.92 \text{kJ/kg}$$

$$h_{gs}' = 1736.5 \text{kJ/kg}$$

$$h_{zr}'' = 3540 \text{kJ/kg}$$

$$h_{zr}' = 3021.65 \text{kJ/kg}$$

$$h_{pw} = 2505.4 \text{kJ/kg}$$

3、锅炉的各项热损失：

锅炉的各项热损失包括机械不完全损失、化学不完全燃烧损失、排烟热损失、散热损失及灰渣物理热损失等。

a、机械不完全损失：

$$q_4 = 4\%$$

可由附表一，表 III 查得。

b、化学不完全燃烧损失

$$q_3 = 0$$

由经验数据，固态排渣和液态排渣煤份炉 $q_3 = 0$ 。

c、排烟热损失

排烟损失的热量可由排烟与冷空气的焓计算，即

$$\begin{aligned} Q_2 &= (I_{py} - \alpha_{py} I_{lk}^0) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \\ &= (17366.754 - 1.20 \times 12755) \left(1 - \frac{4}{100}\right) \\ &= 1978.32 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (1-19)$$

I_{py} —— 排烟焓

I_{lk}^0 —— 理论冷空气焓

α_{py} —— 排烟处过量空气系数，可取 1.20^[2]

由上式得排烟热损失为：

$$\begin{aligned} q_2 &= \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\% \\ &= \frac{1978.32}{26398.68} \times 100\% \\ &= 7.8\% \end{aligned} \quad (1-20)$$

d、散热损失

当实际蒸发量为 1100 t/h 时

$$\begin{aligned} q_5 &= q_5^e \frac{D_e}{D} \% \\ &= 0.2 \times \frac{1080}{1100} \% \\ &= 0.2\% \end{aligned} \quad (1-21)$$

q_5^e —— 当锅炉额定蒸发量大于 900 t/h 时， $q_5^e = 0.2\%$

e、灰渣物理热损失：

$$\begin{aligned} A_{ar} &< (Q_{Dv}^v / 419) \% \\ &< (26377 / 419) \% \\ &< 63\% \end{aligned} \quad (1-22)$$

对于固态排渣，当 $A^y \geq \frac{Q_d^y}{419} \%$ 时才考虑此项。

1. 2. 3、锅炉的热平衡

锅炉的实际燃料消耗量是指每小时实际耗用的燃料量。一般可简称为燃料消耗量。对于大容量燃煤锅炉，考虑到燃料消耗量难预测准，故通常是在测定锅炉输入热量、锅炉每小时有效利用热量以及用反平衡法求出锅炉热效率的基础上，求出燃料消耗量。

1、锅炉的反平衡效率

$$\begin{aligned}\eta_1 &= 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \\ &= 100 - (7.8 + 0 + 4 + 0.2 + 0) \\ &= 88\%\end{aligned}\quad (1-23)$$

2、锅炉的实际耗煤量

$$\begin{aligned}B &= \frac{Q_g}{\eta_1 Q_r} \times 100\% \\ &= \frac{2234215}{88\% \times 26398} \times 100\% \\ &= 96t/h\end{aligned}\quad (1-24)$$

3、锅炉的计算燃料消耗量

$$\begin{aligned}B_j &= B \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \\ &= 96 \times \left(1 - \frac{4}{100}\right) \\ &= 92t/h\end{aligned}\quad (1-25)$$

4、锅炉灰渣量的计算

$$\begin{aligned}A &= B(A_{ar}/100 + q_4 Q_{ar.net}/100/32860) \\ &= 96 \times (24.7/100 + 4 \times 26377/100/32866) \\ &= 26t/h\end{aligned}\quad (1-26)$$

研究锅炉热平衡的目的和意义，就在于弄清燃料中的热量，有多少被有效利用，有多少变成热损失，以及热损失分别表现在哪些方面和大小如何。以便判断锅炉设计和运行水平，进而寻求提高锅炉经济性的有效途径。锅炉设备在运行中应定期进行热平衡试验。（通常称为热效率试验），已查明影响热效率的主要因素，作为该机锅炉工作的依据。

第二章 炉膛设计

煤粉炉是以煤粉为燃料进行燃烧的，它具有燃烧迅速、完全、容量大、效率高、适应煤种广、便于控制调节等优点。因而它是目前电厂锅炉的主要型式。

炉膛也称为燃烧室，它是供煤粉燃烧的地方。

固态排渣煤粉炉的炉膛结构是有一个炉墙围成的长方体空间，其四周布满水冷壁。炉底是由前后水冷壁管弯曲而成的倾斜冷灰斗。炉顶一般是平顶结构，高压以上锅炉一般在平炉顶布置顶棚管过热器。炉膛上部悬挂屏式过热器。炉膛后方为烟气出口。为了改善烟气对屏式过热器的冲刷，充分利用炉膛容积并加强炉膛上部气流的扰动，炉膛出口的下部有后水冷壁弯曲而成的折焰角。

炉膛既是燃烧空间，又是锅炉的换热部件。因此它的结构应该能保证燃料完全燃烧，又能使炉膛出口烟温降低到灰熔点以下。以便使出口以后对流受热面不结渣。为此，炉膛应该满足以下要求：

一、要有良好的炉内空气动力特性。这不仅能够避免火焰冲击炉墙，防止炉膛水冷壁结渣；而且还能使火焰在炉膛内有较好的充满程度，减少炉内死滞漩涡区，从而充分利用炉膛容积，以保证煤粉燃烧过程有足够空间和时间。

二、能布置足够的受热面，将炉膛出口烟温降到允许的数值，以保证炉膛出口及其后的受热面不结渣。

三、要有合适的热强度。按热强度确定的炉膛容积及其截面尺寸和高度应能满足煤粉气流在炉内充分发展、均匀混合和完全燃烧的要求。

2.1 炉膛结构设计

2.1.1 炉膛结构设计（带前屏过热器）：

对于一定参数、一定容量的锅炉来说，燃料单位时间在炉内的放热量是一定的。因此 q_v 取得越大，炉膛容积就小； q_v 取得越小，炉膛容积就大。炉膛容积过小，煤粉在炉内停留时间短，燃烧不完全，同时水冷壁面积小，炉温过高，容积造成结渣。容积过大，炉膛温度过低，对燃烧不利，同时使锅炉造价和金属消耗量增加。因此，要合理设计锅炉容积。

1、锅炉的容积：

$$\begin{aligned}
 V_l &= \frac{BQ_{dw}^y}{3.6q_v} \\
 &= \frac{96 \times 26377}{3.6 \times 120 \times 10^3} \\
 &= 9861m^3
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

q_v ——炉膛容积热强度为 $120 \times 10^3 W/m^3$ ，可由附表二，表 I 查得。

2、炉膛截面积：

$$\begin{aligned}
 A_l &= (BQ_{ar.net}/3.6q_F) \\
 &= (96 \times 26377/3.6/4300000) \\
 &= 163.5m^2
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

q_F ——炉膛截面热强度为 $4.3 \times 10^6 W/m^2$ ，可由附表二，表 II 查得。

3、炉膛宽度

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{A_l \times 1.087} \\
 &= \sqrt{163.5 \times 1.087} \\
 &= 13.3m
 \end{aligned} \tag{2-3}$$

$\frac{a}{b}$ ——炉膛截面宽深比，选取 $\frac{a}{b} = 1.087$ 。

4、炉膛深度

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{A_l}{a} \\
 &= \frac{163.5}{13.3} \\
 &= 12.2m
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

5、冷灰斗容积

$$\begin{aligned}
 V_{hd} &= \frac{(6.920 + b) \times 3.141}{2} \times a \\
 &= \frac{(6.920 + 12.2) \times 3.141}{2} \times 13.3 \\
 &= 399.54m^3
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

冷灰斗出口尺寸按 $0.6 \sim 1.4m$ 取，这里取 $1.2m$ 。冷灰斗高度可取 $3.141m$ ^[3]。

6、折焰角长度

$$\begin{aligned}
 l_z &\approx \frac{1}{3}b \\
 &= \frac{1}{3} \times 12.2 \\
 &= 4.1m
 \end{aligned}
 \tag{2-6}$$

7、折焰角上倾角 $\theta_{\text{上}} = 20^\circ \sim 45^\circ$ 选取，这里选 $\theta_{\text{上}} = 45^\circ$ 。

8、折焰角下倾角 $\theta_{\text{下}} = 20^\circ \sim 30^\circ$ 选取，这里选 $\theta_{\text{下}} = 30^\circ$ 。

9、前屏管径选用 $d \times \delta = 51 \times 6mm$ 。

10、前屏管子总流通面积

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{D_1 - D_{jw}}{3600 \rho \omega} \\
 &= \frac{1080 - 48.6}{3600 \times 1000} \\
 &= 0.2895m^2
 \end{aligned}
 \tag{2-7}$$

D_{jw} ——减温水量 D_{jw} 是锅炉容量的 $3\% \sim 5\%$ ^[3]，这里取 4.5% ，则

$$\begin{aligned}
 D_{jw} &= 4.5\% D_{gr} \\
 &= 4.5\% \times 1080 \times 10^3 \\
 &= 18.6 \times 10^3 kg/h
 \end{aligned}
 \tag{2-8}$$

11、前屏每根管子面积

d_n ——为管子内径。

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (3.14/4)d_n^2 \\
 &= 3.14/4 \times 0.039^2 \\
 &= 119.3 \times 10^{-5} m^2
 \end{aligned}
 \tag{2-9}$$

12、前屏管子总数

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{A}{A_1} \\
 &= \frac{0.2895}{119.3 \times 10^{-5}} \\
 &= 242
 \end{aligned}
 \tag{2-10}$$

13、前屏片数

$$\begin{aligned}
 z_1 &= \frac{a}{s_1} - 1 \\
 &= \frac{12.2}{1.350} - 1 \\
 &= 8
 \end{aligned}
 \tag{2-11}$$

s_1 ——前屏横向管距，按 $s_1 = 550 \sim 1500mm$ 选取，这里 $s_1 = 1350mm$ [3]。

14、前屏单片管子个数

$$\begin{aligned}
 n_1 &= n/8 \\
 &= 242/8 \\
 &= 30
 \end{aligned}
 \tag{2-12}$$

15、前屏深度

$$\begin{aligned}
 b_{qp} &= s_2(n_1 - 1) \times 2 + 2R \\
 &= 61 \times (30 - 1) \times 2 + 2 \times 87 \\
 &= 3712mm
 \end{aligned}
 \tag{2-13}$$

s_2 ——前屏纵向截距 $\frac{s_2}{d} = 1.1 \sim 1.25$ 这里选取 $\frac{s_2}{d} = 1.2$ 。

R ——前屏最小弯曲半径 $R = (1.5 \sim 1.25)d$ ，这里

$$\begin{aligned}
 R &= 1.7d \\
 &= 1.7 \times 51 \\
 &= 87mm
 \end{aligned}
 \tag{2-14}$$

16、前屏与前墙之间距离选取 $1240mm$ 。

17、前后屏之间距离选取 $780mm$ 。

18、炉膛出口通流面积

$$\begin{aligned}
 A_{ch} &= \frac{B_j V_y \theta_l'' + 273}{3600 \omega_y} \\
 &= \frac{92 \times 8.328 \times 1351 + 273}{3600 \times 6} \\
 &= 211m^2
 \end{aligned}
 \tag{2-15}$$

ω_y ——烟气流速选取 $\omega_y = 6m/s$ 。

θ_l'' ——炉膛出口烟气温度可选 $\theta_l'' = 1351^\circ C$ 。

19、水平烟道高度

$$\begin{aligned}
 h_{sh} &= \frac{B_j V_y}{3600 \omega_{sy} a} \frac{\theta_l'' + 273}{273} \\
 &= \frac{92 \times 8.328}{3600 \times 6 \times 13.3} \frac{1351 + 273}{273} \\
 &= 9.5m
 \end{aligned} \tag{2-16}$$

20、炉膛出口高度

$$\begin{aligned}
 h_{ch} &= \frac{A_{ch}}{a} \\
 &= \frac{211}{13.3} \\
 &= 15.8m
 \end{aligned} \tag{2-17}$$

21、前屏高度按 h_{ch} 选定取 $h_{qp} = 15m$ 。

22、折焰角高度

$$\begin{aligned}
 h_{zy} &= h_{qp} - h_{sy} - l_z \\
 &= 15 - 9.5 - 4.2 \\
 &= 1.3m
 \end{aligned} \tag{2-18}$$

23、炉顶容积

$$\begin{aligned}
 V_{ld} &= (A_1 + A_2)a \\
 &= (80.7 + 24.5) \times 13.3 \\
 &= 1212.2m^3
 \end{aligned} \tag{2-19}$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (1240 + 780 + b_{qp})h_{qp} \\
 &= (1.240 + 0.780 + 3.712) \times 15 \\
 &= 80.7m^2
 \end{aligned} \tag{2-20}$$

$$\begin{aligned}
 A_2 &= (1240 + 780 + b_{qp} + b) \times 2.424 \times 0.5 \\
 &= (1.240 + 0.780 + 3.712 + 12.2) \times 2.424 \times 0.5 \\
 &= 24.5m^2
 \end{aligned} \tag{2-21}$$

24、炉膛主体高度

$$\begin{aligned}
 h_{lt} &= \frac{V_l - V_{ld} - V_{hd}}{A_l} \\
 &= \frac{9861.6 - 1212.2 - 399.54}{2} \\
 &= 54m
 \end{aligned} \tag{2-22}$$

由计算结果可知炉膛有良好的炉内空气动力特性，能够避免火焰冲击炉墙，防止炉膛水冷壁结渣；而且还能使火焰在炉膛内有较好的充满程度，减少炉内死滞漩涡区，从而充

分利用炉膛容积，能保证煤粉燃烧过程有足够空间和时间；能布置足够的受热面，将炉膛出口烟温降到允许的数值，能保证炉膛出口及其后的受热面不结渣，有合适的热强度；按热强度确定的炉膛容积及其截面尺寸和高度应能满足煤粉气流在炉内充分发展、均匀混合和完全燃烧的要求。

2. 1. 2、水冷壁的设计

水冷壁是吸收辐射热量的主要场所，水冷壁的水管的布置和工作状况直接影响着锅炉的效率。炉膛里布置水冷壁，不仅可以防止高温火焰与炉壁直接接触，而且可降低炉壁温度从而起着保护炉壁的作用。在布置恰当时，还可以充分利用高温下辐射热强度过于对流热强度的特点，降低锅炉总受热面的金属消耗量与造价。

1、前后墙水冷壁回路个数

$$\begin{aligned} z_1 &= 13.3/2.5 \\ &= 6 \end{aligned}$$

按每个回路的加热宽度 $\leq 2.5m$

2、左右两侧水冷壁回路个数

$$\begin{aligned} z_2 &= 12.2/2.5 \\ &= 5 \end{aligned}$$

按每个回路的加热宽度 $\leq 2.5m$

3、管径及壁厚 $d \times \delta = 63.5 \times 7.5mm$ [1]。

4、管子截距按 $\frac{s}{d} = 1.3 \sim 1.35$ ，这里

$$\begin{aligned} s &= 1.32d \\ &= 1.32 \times 63.5 \\ &= 83.8mm \end{aligned}$$

5、前后墙管子根数

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{a}{s} + 1 \\ &= \frac{13.3}{0.0838} + 1 \\ &= 159 \end{aligned} \tag{2-23}$$

6、左右侧管子根数

$$\begin{aligned}n_2 &= \frac{b}{s} + 1 \\ &= \frac{12.2}{0.0838} + 1 \\ &= 146\end{aligned}\tag{2-24}$$

水冷壁的水管的布置和工作状况能保证锅炉的效率。炉膛里布置水冷壁，可以防止高温火焰与炉壁直接接触，可降低炉壁温度保护炉壁；可以充分利用高温下辐射热强度过于对流热强度的特点，降低锅炉总热面的金属消耗量与造价。

2. 2 燃烧器的结构设计

煤粉炉的燃烧设备包括煤粉燃烧器、点火装置和炉膛。煤粉燃烧器也称为喷燃器。它是煤粉炉燃烧设备的主要组成部分，其作用是：将携带煤粉的一次风和助燃的二次风送入炉膛，并组织一定的气流结构，使煤粉能迅速稳定的着火；同时使煤粉和空气合理混合，达到煤粉在炉内迅速完全燃烧。燃烧器的性能，对燃烧器的稳定性和经济性有很大的影响。一个好的燃烧器应能满足下列要求：

- 一、一次风和二次风出口界面要能够保证合适的一、二次风速比；
- 二、要有足够的搅动性，以便风粉能很好的混合；
- 三、煤粉气流着火稳定，火焰在炉内的充满程度好；
- 四、阻力要小；
- 五、应有较大的调解范围，以适应煤种变化的需要；
- 六、沿燃烧器出口界面的煤粉分布要均匀，以保证煤粉很好混合。

煤粉燃烧器的型式很多，一般可按着射流是否旋转分为直流燃烧器和旋流燃烧器两类。

从燃烧器喷口出来的气流称为射流。如果有直流燃烧器喷出一股不旋转直流射流进入一个充满静止气体的无限空间中，则称为直流自由射流。由于炉膛空间较大，射入炉膛的直流射流也可近似的看成直流自由射流。当喷射速度很大，达到稳流状态时，则为直流紊流自由射流。直流燃烧器的射流自喷口射出后一般都处于稳流状态。

直流煤粉燃烧器的出口是由一组圆形、矩形或多边形的喷口所组成。煤粉气流（一次风）、燃烧所需空气（二次风）以及由制粉系统来的乏气（三次风）分别有不同喷口以直流射流形式喷进炉膛。直流煤粉燃烧器大多布置在炉膛四角上，由四角的燃烧器喷出的四

股气流在炉膛中心形成一个或两个假想切圆。这种组织燃烧的方法常称为切圆燃烧。我国直流煤粉燃烧器的锅炉大都采用此种切圆燃烧。

旋流燃烧器是利用旋流器使气流产生旋转运动的。旋流燃烧器中所采用的旋流燃烧器主要有以下几种：蜗壳、切向叶片及轴向叶片等。

2. 2. 1、燃烧器的设计

本锅炉燃烧器是根据煤的 V^r 大小，按附表二，表III选用的四角布置的直流燃烧器。因是大容量锅炉，所以配风方式选用分级配风，并采用切圆（大小切圆直径选取 $\phi 1000$ 和 $\phi 700$ ）燃烧方式。这样有利于加强炉内气流扰动，使燃料在炉内的停留时间增长。为了加强燃烧器对煤种的适应性及适应负荷的变化，燃烧器的喷口截面采用可调的，以调节气流量和火炬长度。此外，喷口还可以摆动一定角度，单个喷口的摆动为 $\pm 10^\circ$ ，联动时能上下摆动 $\pm 20^\circ$ ，这样可改变火焰中心的高度。燃烧器风口布置^[3]，其中一次风口层数为六层，四层燃油喷口，六层二次风喷口，气流射出喷口后，在炉膛中央形成 $\phi 700$ 和 $\phi 1000$ 两个切圆。

2. 2. 2、燃烧器结构尺寸计算

1、一次风口面积（单只）

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{r_1 \alpha_1 V^0 B_j}{100 \times 3z \times 3600 \omega_1} \times \frac{273 + t_1}{273} \\
 &= \frac{22 \times 1.2 \times 6.41 \times 92}{100 \times 3 \times 4 \times 3600 \times 23} \times \frac{273 + 340}{273} \\
 &= 0.3268 m^2 \qquad (2-25)
 \end{aligned}$$

ω_1 ——一次风速为 $23m/s$ ，可按附表二，表 IV 选取。

r_1 ——一次风率为 22%，可按附表二，表 V 选取。

t_1 ——一次风温为 $340^\circ C$ ，由制粉系统的设计计算确定^[3]。

z ——燃烧器的数量，因为是四角布置，所以 $z = 4$ 。

2、二次风口面积（单只）

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \frac{r_2 \alpha_l V^0 B_j}{100 \times 3z \times 3600 \omega_2} \times \frac{273+t_2}{273} \\
 &= \frac{57 \times 1.2 \times 6.41 \times 92}{100 \times 4 \times 4 \times 3600 \times 47} \times \frac{273+330}{273} \\
 &= 0.348 m^2
 \end{aligned} \tag{2-26}$$

ω_2 ——二次风速为 $47m/s$ ，可按附表二，表 IV 选取。

r_2 ——二次风率为 57% ，可按附表二，表 IV 选取。

t_2 ——二次风温为 $330^\circ C$ [3]。

3、三次风口面积（单只）

$$\begin{aligned}
 A_3 &= \frac{r_3 \alpha_l V^0 B_j}{100z \times 3600 \omega_3} \times \frac{273+t_3}{273} \\
 &= \frac{57 \times 1.2 \times 6.41 \times 92}{100 \times 4 \times 3600 \times 47} \times \frac{273+330}{273} \\
 &= 0.298 m^2
 \end{aligned} \tag{2-27}$$

ω_3 ——二次风速为 $47m/s$ ，可按附表二，表 IV 选取。

r_3 ——二次风率为 21% ，可按附表二，表 V 选取。

t_3 ——二次风温为 $100^\circ C$ [3]。

4、燃烧器矩形对角线长度

$$\begin{aligned}
 2I_j &\approx \sqrt{b^2 - a^2} \\
 &= \sqrt{12.2^2 + 13.3^2} \\
 &= 18048 mm
 \end{aligned} \tag{2-28}$$

5、特性比 $\frac{h_r}{b_r} = 12$ ，初步选定。

6、特性比值

$$\begin{aligned}
 \frac{2I_j}{b_r} &= 9.438 \left(\frac{h_r}{b_r} \right)^{0.583} \\
 &= 9.438 \times 12^{0.583} \\
 &= 26.8
 \end{aligned} \tag{2-29}$$

7、燃烧器喷口宽度

$$\begin{aligned}
 b_r &= \frac{2i_j}{2I_j} \\
 &= \frac{18.048}{26.8} \\
 &= 0.673m
 \end{aligned}
 \tag{2-30}$$

8、一次风喷口高度

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \frac{A_1}{b_r} \\
 &= \frac{0.3268}{0.673} \\
 &= 0.486m
 \end{aligned}
 \tag{2-31}$$

9、二次风喷口高度

$$\begin{aligned}
 h_2 &= \frac{A_2}{b_r} \\
 &= \frac{0.348}{0.673} \\
 &= 0.517m
 \end{aligned}
 \tag{2-32}$$

10、三次风喷口高度

$$\begin{aligned}
 h_3 &= \frac{A_3}{b_r} \\
 &= \frac{0.298}{0.673} \\
 &= 0.443m
 \end{aligned}
 \tag{2-33}$$

11、燃烧器高度

按 A_1 、 A_2 、 A_3 的要求，得 $h_r = 7.730m$ ；核算

$$\begin{aligned}
 \frac{h_r}{b_r} &= \frac{7.73}{0.673} \\
 &= 12.3
 \end{aligned}$$

接近原定值，不必重算。

12、最下一排燃烧器的下边缘距离冷灰斗上沿的距离，按 $l = (4 \sim 5)b_r$ 选取，这里

$$\begin{aligned}
 l &= 4.5b_r \\
 &= 4.5 \times 0.673 \\
 &= 3.02m
 \end{aligned}
 \tag{2-34}$$

13、条件火焰长度

$l_{hy} = 28m$ 的计算结果符合规定^[3]，炉膛实际高度合理。

燃烧器应能满足要求：一、一次风和二次风出口界面有合适一、二次风速比；二、有足够的搅动性，能使风粉能很好的混合；三、煤粉气流着火稳定，火焰在炉内的充满程度好；四、阻力小；五、有较大的调解范围，能适应煤种变化的需要；六、沿燃烧器出口界面的煤粉分布均匀，保证煤粉很好混合。

2. 3 炉膛和前屏过热器结构尺寸计算

过热器是锅炉的重要部件，其受热面金属温度是锅炉个受热面中最高值，其出口气温对机组安全经济运行有十分重要的影响。过热器设计与运行的原则有：

- 一、防止受热面金属温度超过材料的许用温度；
- 二、过热器温度特性好，在较大的负荷范围内能通过调节维持额定气温；
- 三、防止受热面管束积灰、磨损和腐蚀。

过热器是将饱和蒸汽加热成具有一定温度的过热蒸汽的部件；过热器出口的过热蒸汽又称为主蒸汽。过热器分为：对流过热器、屏式过热器和壁式过热器。

屏式过热器有大屏、前屏及后屏三种，大屏和前屏过热器布置在炉膛上前部，屏间距离较大，屏数较少，吸收炉膛内高温烟气的辐射传热。后屏过热器布置在炉膛出口处，屏数较多，屏间距较小，它既吸收炉膛内的辐射传热，又吸收烟气冲刷受热面时的对流传热，故称半辐射过热器。

现在大型锅炉广泛采用屏式过热器主要是以下原因：

一、屏式过热器吸收炉膛内相当数量的辐射热量，适应大容量高参数锅炉过热器吸热量相对增加、水冷壁吸热量相对减少的需要，他补充了水冷壁吸收炉膛辐射热的不足，实现了炉膛必需的辐射传热量，把炉膛出口烟气温度的限制在合理范围内。

二、对于燃烧器四角布置切圆燃烧方式的炉膛，由于炉内气流的旋转运动，在炉膛出口处会发生流动偏转、速度分布不均、烟温左右偏差。屏式对烟气流的偏移能起到阻尼和导流作用。

2. 3. 1、炉膛结构尺寸计算

1、侧墙面积

$$\begin{aligned}
 A_c &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \\
 &= 80.7 + 24.5 + 662.5 + 30.0 \\
 &= 797.9m^2
 \end{aligned} \tag{2-35}$$

式中 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 可由以下公式得：

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (1.24 + 3.712 + 0.78)h_{qp} \\
 &= (1.24 + 3.712 + 0.78) \times 15 \\
 &= 80.7m^2
 \end{aligned} \tag{2-36}$$

$$\begin{aligned}
 A_2 &= 0.5 \times (1.24 + 3.712 + 0.78 + b) \times 2.424 \\
 &= 0.5 \times (1.24 + 3.712 + 0.78 + 12.2) \times 2.424 \\
 &= 24.5m^2
 \end{aligned} \tag{2-37}$$

$$\begin{aligned}
 A_3 &= ah_t \\
 &= 13.3 \times 54.337 \\
 &= 662.5m^2
 \end{aligned} \tag{2-38}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= 0.5 \times (6.928 + b) \times 3.141 \\
 &= 0.5 \times (6.928 + 12.2) \times 3.141 \\
 &= 30.0m^2
 \end{aligned} \tag{2-39}$$

2、前墙的面积

$$\begin{aligned}
 A_q &= \left[69.337 + \frac{0.5 \times (12.2 + 6.9287)}{\cos 50^\circ} + \frac{6.9287}{2} \right] \times 13.3 \\
 &= 1022.7m^2
 \end{aligned} \tag{2-40}$$

3、后墙的面积

$$\begin{aligned}
 A_h &= 13.3 \times \left(4.849 + 54.337 + 4.099 + \frac{6.9287}{2} \right) \\
 &= 887.8m^2
 \end{aligned} \tag{2-41}$$

4、炉膛出口烟窗面积

$$\begin{aligned}
 A_{ch} &= (12.2 - 5.35 - 4.849 \times \sin 60^\circ + 15) \times 13.3 \\
 &= 234.8m^2
 \end{aligned} \tag{2-42}$$

5、炉顶包覆面积

$$\begin{aligned}
 A_{td} &= (1.24 + 3.712 + 0.78) \times 13.3 \\
 &= 71.16m^2
 \end{aligned} \tag{2-43}$$

6、前屏面积

$$\begin{aligned} A_{qp} &= 2 \times 8 \times 3.172 \times 15 \\ &= 890m^2 \end{aligned} \quad (2-44)$$

7、燃烧器面积

$$\begin{aligned} A_r &= 4 \times 2 \times 13 \\ &= 104m^2 \end{aligned} \quad (2-45)$$

8、整个炉膛的平均角系数

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{2A_c x + A_q x + A_h x + A_{ch} x_{ch} + A_{ld} x_{ld} + A_{qp} x_{qp}}{2A_c + A_q + A_h + A_{ch} + A_{ld} + A_{qp}} \\ &= \frac{2 \times 797.9 \times 1.0 + 1022.7 \times 1.0 + 887.8 \times 1.0 + 234.8 \times 1.0 + 71.16 \times 0.96 + 890 \times 0.98}{2 \times 97.9 + 1022.7 + 887.8 + 234.8 + 71.16 + 890} \\ &= 0.995 \end{aligned} \quad (2-46)$$

x ——按模式水冷壁选取1.0。

x_{ld} ——炉顶角系数得0.98。^[3]

x_{qp} ——前屏角系数得0.96。^[3]

x_{ch} ——炉膛出口烟窗处角系数取1.0。^[3]

9、前屏区的侧面积

$$\begin{aligned} A_{pq,c} &= 2h_{qp} b_{qp} \\ &= 2 \times 15 \times 3.712 \\ &= 111.25m^2 \end{aligned} \quad (2-47)$$

10、前屏区的炉顶面积

$$\begin{aligned} A_{pq,ld} &= ab_{qp} \\ &= 13.3 \times 3.712 \\ &= 49.37m^2 \end{aligned} \quad (2-48)$$

11、前屏区的炉墙面积

$$\begin{aligned} A_{pq} &= A_{qp,c} + A_{qp,ld} \\ &= 111.25 + 49.37 \\ &= 160.73m^2 \end{aligned} \quad (2-49)$$

12、炉膛自由容积的水冷壁面积

$$\begin{aligned}
 A_{zy} &= A_q + A_h + 2(A_c - \frac{1}{2}A_r - \frac{1}{2}A_{qp,c}) + A_{ch} + (A_{ld} - A_{qp,ld}) \\
 &= 1022.7 + 887.8 + 2 \times (797.9 - \frac{1}{2} \times 38.4 - \frac{1}{2} \times 111.25) + (71.16 - 49.37) \\
 &= 3613m^2
 \end{aligned} \tag{2-50}$$

13、炉膛容积

$$\begin{aligned}
 V_l &= A_c a \\
 &= 797.9 \times 13.3 \\
 &= 10612m^3
 \end{aligned} \tag{2-51}$$

14、前屏占容积

$$\begin{aligned}
 V_p &= h_p a \\
 &= 3.712 \times 13.3 \\
 &= 740.5m^3
 \end{aligned} \tag{2-52}$$

15、炉膛的自由容积

$$\begin{aligned}
 V_{zy} &= V_l - V_p \\
 &= 10612 - 740.5 \\
 &= 9872m^3
 \end{aligned} \tag{2-53}$$

16、前屏区与炉膛的水平分割面积

$$\begin{aligned}
 A_{f,sh} &= b_{qp} a \\
 &= 3.712 \times 13.3 \\
 &= 49.37m^2
 \end{aligned} \tag{2-54}$$

17、前屏区与炉膛的垂直分割面积

$$\begin{aligned}
 A_{f,ch} &= 2h_{qp} a \\
 &= 2 \times 3.712 \times 13.3 \\
 &= 399m^2
 \end{aligned} \tag{2-55}$$

18、自由容积的辐射层有效厚度

$$\begin{aligned}
 S_{zy} &= \frac{3.6V_{zy}}{A_{zy}} \\
 &= \frac{3.6 \times 9872}{3613} \\
 &= 8.84m
 \end{aligned} \tag{2-56}$$

19、前屏间容积的辐射层有效厚度

$$\begin{aligned}
 S_{qp} &= \frac{3.6V_p}{A_{qp} + A_{pq} + A_{f,sh} + A_{f,ch}} \\
 &= \frac{3.6 \times 740.5}{160.73 + 890 + 49.36 + 399} \\
 &= 1.78m
 \end{aligned} \tag{2-57}$$

20、炉膛的辐射层有效厚度

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{3.6V_l}{A_{qp} + A_{pq} + A_{zy}} \left(1 + \frac{A_{qp}}{A_{zy} + A_{pq}} \frac{V_{zy}}{V_l} \right) \\
 &= \frac{3.6 \times 10612}{160.73 + 890 + 3613} \left(1 + \frac{890}{3613 + 160.73} \frac{9872}{10612} \right) \\
 &= 9.89m
 \end{aligned} \tag{2-58}$$

21、燃烧器相对高度

$$\begin{aligned}
 \frac{h_r}{H_l} &= \frac{10.371}{54.337} \\
 &= 0.142
 \end{aligned} \tag{2-59}$$

h_r ——燃烧器中心线高度为10.371m。

H_l ——炉膛高度为54.337m。

22、火焰中心相对高度， x_l 为0.142。^[3]

2. 3. 2、前屏过热器结构尺寸计算

1、蒸汽流通截面积

$$\begin{aligned}
 A &= 0.785d_n^2 z_1 n_1 \\
 &= 0.785 \times 0.039^2 \times 8 \times 30 \\
 &= 0.287m^2
 \end{aligned} \tag{2-60}$$

管径及壁厚 $d \times \delta = 51 \times 6mm$ 、单片管子根数 $n_1 = 30$ 、前屏片数 $z_1 = 6$ （由设计结构可知）。

2、蒸汽质量流速

$$\begin{aligned}
 \rho\omega &= \frac{D - D_j}{3600A} \\
 &= \frac{1080 - 16.8}{3600 \times 0.289} \\
 &= 1002.9m/s
 \end{aligned} \tag{2-61}$$

3、蒸汽流速

$$\begin{aligned}w &= \rho \omega v_{pj} \\ &= 1002.9 \times 0.013 \\ &= 13.04 \text{ m/s}\end{aligned}\tag{2-62}$$

4、前屏辐射受热面积

$$\begin{aligned}A_{qp} &= 2z_1 b_{qp} \times 10x_{qp} \\ &= 2 \times 8 \times 3.712 \times 10 \times 0.98 \\ &= 873.06 \text{ m}^2\end{aligned}\tag{2-63}$$

屏式过热器吸收炉膛内相当数量的辐射热量，适应大容量高参数锅炉过热器吸热量相对增加、水冷壁吸热量相对减少的需要，他补充了水冷壁吸收炉膛辐射热的不足，实现了炉膛必需的辐射传热量，并把炉膛出口烟气温度限制在合理范围内。燃烧器四角布置切圆燃烧方式的炉膛，由于炉内气流的旋转运动，在炉膛出口处会发生流动偏转、速度分布不均、烟温左右偏差。屏式对烟气流的偏移能起到阻尼和导流作用。

第三章 炉膛及后屏热力计算

3. 1 炉膛热力计算

炉膛的热力计算是锅炉校核的基础，有了锅炉的热力计算就能够更好的节约燃料，提高锅炉的经济性。

3. 1. 1、炉膛的热力计算

1、空预器出口过量空气系数

$$\begin{aligned}\beta_{ky}'' &= \alpha_l'' - (\Delta\alpha_l + \Delta\alpha_{cf}) \\ &= 1.2 - (0.05 + 0.06) \\ &= 1.09\end{aligned}\quad (3-1)$$

$\Delta\alpha_l$ ——炉膛漏风系数，可由附表二，表 VI 查得。

$\Delta\alpha_{cf}$ ——制粉系统漏风系数，可由附表二，表 VI 查得。

2、空气带入炉内热量

$$\begin{aligned}Q_k &= \beta_{ky}'' H_{rk}^0 + (\Delta\alpha_l + \Delta\alpha_{cf}) H_{lk}^0 \\ &= 1.09 \times 129.6 + (0.05 + 0.06) \times 129.6 \\ &= 2317.6 \text{ kJ / kg}\end{aligned}\quad (3-2)$$

H_{rk}^0 ——理论空气焓。^[3]

H_{lk}^0 ——理论冷空气焓。^[3]

3、1kg 燃料带入炉内的热量

$$\begin{aligned}Q_l &= Q_r \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_k \\ &= 26377 \frac{100 - 0 - 4 - 0}{4} + 2317.6 \\ &= 2868.7 \text{ kJ / kg}\end{aligned}\quad (3-3)$$

4、烟气的平均热容量

$$\begin{aligned}
 V_{c_{pj}} &= \frac{Q_l - H_l''}{\theta_a - \theta_l''} \\
 &= \frac{2868.7 - 12091}{2400 - 1351} \\
 &= 12.5 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

θ_a ——理论燃烧温度。^[2]

θ_l'' ——炉膛出口烟温，假定 $\theta_l'' = 1351^\circ\text{C}$ 。

5、三原子气体辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 K_y &= 10 \left(\frac{0.78 + 1.6r_{H_2O}}{\sqrt{10p_n}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{T_l''}{1000} \right) \\
 &= 10 \times \left(\frac{0.78 + 1.6 \times 0.0599}{\sqrt{10 \times 0.0206 \times 9.989}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{1351}{1000} \right) \\
 &= 3.3 \frac{1}{m \cdot \text{MPa}}
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

r_{H_2O} ——水蒸气容积份额为0.0599，查附表二，表 VII 得。

r_n ——三原子气体容积份额为0.2013，查附表二，表 VII 得。

p ——炉膛压力为0.098MPa。

p_n ——三原子气体分压力

$$\begin{aligned}
 p_n &= pr_n \\
 &= 0.098 \times 0.2103 \\
 &= 0.0206 \text{ MPa}
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

6、灰粒子辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 k_h &= \frac{55900}{\sqrt[3]{T_l''^2 d_h^2}} \\
 &= \frac{55900}{\sqrt[3]{1351^2 \times (1.3 \times 10^{-6})^2}} \\
 &= 84 \frac{1}{m \cdot \text{MPa}}
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

d_h ——灰粒的平均直径，取 $d_h = 13 \mu\text{m}$ 。

7、半发光火焰辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 k &= K_y r_n + K_h \mu_h + K_j x_1 x_2 \\
 &= 3.3 \times 0.2103 + 84 \times 0.0289 + 10 \times 0.5 \times 0.1 \\
 &= 4.41 \frac{1}{m \square MPa}
 \end{aligned} \tag{3-8}$$

K_j ——焦碳灰粒子辐射减弱系数，选用 $10 \frac{1}{m \square MPa}$ 。

x_1 、 x_2 ——考虑火焰中焦碳粒子浓度影响的无因次量，可选取 0.5、0.1。^[3]

μ_h ——灰离子的份额，可查附表二，表 VII 得。

8、炉膛火焰有效黑度

$$\begin{aligned}
 a_{hy} &= 1 - e^{-K_p S} \\
 &= 1 - e^{-4.41 \times 0.098 \times 9.989} \\
 &= 0.95
 \end{aligned} \tag{3-9}$$

9、自由容积内的三原子气体辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 K_y &= 10 \left(\frac{0.78 + 1.6 r_{H_2O}}{\sqrt{10 p_n \square S_{zy}}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{T_l''}{1000} \right) \\
 &= 10 \times \left(\frac{0.78 + 1.6 \times 0.0599}{\sqrt{10 \times 0.0206 \times 9.84}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{1351}{1000} \right) \\
 &= 3.46 \frac{1}{m \square MPa}
 \end{aligned} \tag{3-10}$$

10、自由容积的火焰有效黑度

$$\begin{aligned}
 a_{zy} &= 1 - e^{-K_p S_{zy}} \\
 &= 1 - e^{-4.41 \times 0.098 \times 9.84} \\
 &= 0.92
 \end{aligned} \tag{3-11}$$

11、屏间容积内的三原子气体辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 K_y &= 10 \left(\frac{0.78 + 1.6 r_{H_2O}}{\sqrt{10 p_n \square S_{pq}}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{T_l''}{1000} \right) \\
 &= 10 \times \left(\frac{0.78 + 1.6 \times 0.0599}{\sqrt{10 \times 0.0206 \times 1.78}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{1351}{1000} \right) \\
 &= 7.21 \frac{1}{m \square MPa}
 \end{aligned} \tag{3-12}$$

12、屏间容积的火焰有效黑度

$$\begin{aligned}
 a_{pr} &= 1 - e^{-K_p S_{pq}} \\
 &= 1 - e^{-4.41 \times 0.098 \times 1.78} \\
 &= 0.52
 \end{aligned} \tag{3-13}$$

13、屏宽 A 与 S_{zy} 的比值 $\frac{A}{S_{zy}} = 0.40$ ，屏宽 A 与 S_1 屏截距之比 $\frac{A}{S_1} = 1.823$ 。

14、屏的黑度

$$\begin{aligned} a_p &= a_{pr} + \varphi_p c_p a_{zy} \\ &= 0.53 + 0.16 \times 0.95 \times 0.92 \\ &= 0.72 \end{aligned} \quad (3-14)$$

c_p ——屏的修正系数为 0.95。^[3]

φ_p ——屏的辐射系数为 0.16。^[3]

15、屏区的黑度

$$\begin{aligned} a_{pq} &= a_{pr} + \varphi_{pq} c_{pq} a_{zy} \\ &= 0.53 + 0.08 \times 0.86 \times 0.92 \\ &= 0.63 \end{aligned} \quad (3-15)$$

c_{pq} ——屏区的修正系数为 0.86。^[3]

φ_{pq} ——屏区的辐射系数为 0.08。^[3]

16、计及暴光不均匀的屏的面积

$$\begin{aligned} A'_{qp} &= A_{qp} z_p \bar{x} \\ &= 890 \times 0.74 \times 0.995 \\ &= 225.9m^2 \end{aligned} \quad (3-16)$$

z_p ——屏的暴光不均匀系数，由下式得

$$\begin{aligned} z_p &= \frac{a_p}{a_{zy}} \\ &= \frac{0.72}{0.92} \\ &= 0.74 \end{aligned} \quad (3-17)$$

17、计及暴光不均匀的屏区的面积

$$\begin{aligned} A'_{pq} &= A_{pq} z_{pq} \bar{x} \\ &= 160.73 \times 0.68 \times 0.995 \\ &= 46.63m^2 \end{aligned} \quad (3-18)$$

z_{pq} ——屏区的暴光不均匀系数，由下式得

$$\begin{aligned}
 z_{pq} &= \frac{a_{pq}}{a_{zy}} \\
 &= \frac{0.63}{0.92} \\
 &= 0.68
 \end{aligned} \tag{3-19}$$

18、炉墙总面积

$$\begin{aligned}
 A_{lq} &= A_{zy} + A'_{qp} + A'_{pq} \\
 &= 3613 + 445.9 + 46.63 \\
 &= 11241.5m^2
 \end{aligned} \tag{3-20}$$

19、平均热有效系数

$$\begin{aligned}
 \phi_{pj} &= \frac{\phi[A_q + A_n + 2(A_c - \frac{1}{2}A_r - \frac{1}{2}A_{pq,c})] + \phi_{ld}(A_{ld} - A_{pq,ld}) + \phi_p A'_{qp} + \phi A_{pq,c} z_{pq} + \phi_{ld} A_{pq,ld} z_{pq}}{A_{lq}} \\
 &= \frac{0.45 \times [1022.7 + 887.8 + 2 \times (797.9 - \frac{1}{2} \times 38.4 - \frac{1}{2} \times 111.25)] + 0.46 \times (71.16 - 49.37)}{11241.5} \\
 &\quad + \frac{0.37 \times 225.9 + 0.45 \times 111.25 \times 0.61 + 0.46 \times 49.37 \times 0.61}{11241.5} \\
 &= 0.45
 \end{aligned} \tag{3-21}$$

ϕ ——前后侧墙水冷壁的热有效系数：

$$\begin{aligned}
 \phi &= \zeta x \\
 &= 0.45 \times 1.0 \\
 &= 0.45
 \end{aligned} \tag{3-22}$$

ζ ——前后侧墙水冷壁的沾污系数为0.45。^[3]

ϕ_{ld} ——炉顶包覆管的热有效系数：

$$\begin{aligned}
 \phi_{ld} &= \zeta_{ld} x_{ld} \\
 &= 0.45 \times 0.96 \\
 &= 0.436
 \end{aligned} \tag{3-23}$$

ζ_{ld} ——前后侧墙水冷壁的沾污系数为0.45。^[3]

ϕ_p ——屏的热有效系数：

$$\begin{aligned}
 \phi_p &= \zeta_p x_{qp} \\
 &= 0.35 \times 0.96 \\
 &= 0.37
 \end{aligned} \tag{3-24}$$

ζ_p ——屏的沾污系数为0.35。^[3]

ϕ_{ch} ——炉膛出口处屏的热有效系数:

$$\begin{aligned}\phi_{ch} &= \zeta_{ch} x_{ch} \\ &= 0.44 \times 1.0 \\ &= 0.44\end{aligned}\quad (3-25)$$

ζ_{ch} ——炉膛出口处屏的沾污系数为0.44。^[3]

20、炉膛黑度

$$\begin{aligned}a_l &= \frac{a_{hy}}{a_{hy} + (1 - a_{hy})\phi_{pj}} \\ &= \frac{0.95}{0.95 + (1 - 0.95) \times 0.452} \\ &= 0.923\end{aligned}\quad (3-26)$$

21、炉膛出口烟温

$$\begin{aligned}\theta_l'' &= \frac{\theta_a + 273}{M[3.6\sigma_0\phi_{pj}A_{tq}a_l T_a^3 / (\phi B_j V C_{pj})]^{0.6} + 1} - 273 \\ &= \frac{2300 + 273}{0.44 \times [3.6 \times 0.68 \times 0.45 \times 11241.5 \times 1.20 \times 2573^3 / (0.96 \times 92 \times 83328 \times 0.86)]^{0.6} + 1} - 273 \\ &= 1342^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (3-27)$$

22、炉膛吸热量

$$\begin{aligned}Q_l^f &= \varphi(Q_l - H_l'') \\ &= 0.96 \times (2869.5 - 1280) \\ &= 26318.9\text{kJ/kg}\end{aligned}\quad (3-28)$$

H_l'' ——炉膛出口烟焓1280kJ/kg。^[3]

23、炉膛容积热强度

$$\begin{aligned}q_v &= \frac{BQ_{dw}^y}{3.6V_l} \\ &= \frac{96 \times 26377}{3.6 \times 9861.6} \\ &= 1.2 \times 10^6\text{W/m}^3\end{aligned}\quad (3-29)$$

24、炉膛截面热强度

$$\begin{aligned}
 q_f &= \frac{BQ_{dw}^y}{3.6A_f} \\
 &= \frac{96 \times 26377}{3.6 \times 163.5} \\
 &= 4.23 \times 10^6 \text{ W / m}^2
 \end{aligned} \tag{3-30}$$

25、炉内平均热辐射强度

$$\begin{aligned}
 q_l^{pj} &= \frac{BQ_{dw}^y}{3.6A_{lq}} \\
 &= \frac{96 \times 26377}{3.6 \times 11241.5} \\
 &= 280 \times 10^3 \text{ W / m}^2
 \end{aligned} \tag{3-31}$$

26、炉顶辐射强度

$$\begin{aligned}
 q_{ld} &= \eta_{ld} q_l^{pj} \\
 &= 0.66 \times 280 \times 10^3 \\
 &= 185 \times 10^3 \text{ W / m}^2
 \end{aligned} \tag{3-32}$$

η_{ld} ——炉顶辐射吸热系数。^[3]

27、炉顶辐射受热面积

$$\begin{aligned}
 A'_{ld} &= (A_{ld} - A_{pq,ld})x_{ld} + A'_{pq,ld}x_{z,pq} \\
 &= (71.6 - 49.37) \times 0.96 + 49.37 \times 1.0 \times 0.61 \\
 &= 52.90 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{3-33}$$

28、炉顶吸热量

$$\begin{aligned}
 Q_{ld} &= 3.6A'_{ld}q_{ld} / B_j \\
 &= 3.6 \times 52.90 \times 185 \times 10^3 / 92 \\
 &= 376 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned} \tag{3-34}$$

29、前屏辐射热强度

$$\begin{aligned}
 q_{qp} &= \eta_{qp} q_l^{pj} \\
 &= 0.84 \times 280 \times 10^3 \\
 &= 235 \times 10^3 \text{ W / m}^2
 \end{aligned} \tag{3-35}$$

30、前屏吸热量

$$\begin{aligned}
 Q_{qp} &= 3.6A'_{qp}q_{qp} / B_j \\
 &= 3.6 \times 225.1 \times 280 \times 10^3 / 92 \\
 &= 2077.3 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned} \tag{3-36}$$

31、后屏辐射热强度

$$\begin{aligned}
 q_{hp} &= \beta \eta_{hp} q_i^{pj} \\
 &= 0.84 \times 280 \times 10^3 \\
 &= 231 \times 10^3 \text{ W} / \text{m}^2
 \end{aligned} \tag{3-37}$$

32、后屏吸热量

$$\begin{aligned}
 Q_{qp} &= 3.6 A_{hp} q_{hp} / B_j \\
 &= 3.6 \times 234.8 \times 235 \times 10^3 / 92 \\
 &= 1001 \text{ kJ} / \text{kg}
 \end{aligned} \tag{3-38}$$

33、前屏焓增

$$\begin{aligned}
 \Delta h_{qp} &= \frac{Q_{qp} B_j}{D - D_{jw1} - D_{jw2}} \\
 &= \frac{2077 \times 92}{1080 - 21.3 - 27.3} \\
 &= 265 \text{ kJ} / \text{kg}
 \end{aligned} \tag{3-39}$$

34、前屏出口蒸汽焓

$$\begin{aligned}
 h_{qp}'' &= h_{bf}'' + \Delta h_{qp} \\
 &= 2779.8 + 265 \\
 &= 2985 \text{ kJ} / \text{kg}
 \end{aligned} \tag{3-40}$$

h_{bf}'' ——由于包覆出口温度为 355°C 。^[3]

35、前屏出口蒸汽温度为 392°C 。^[3]

36、炉膛出口烟温校核

$$\begin{aligned}
 \Delta \theta_l'' &= |\theta_{l(\text{假定})}'' - \theta_{l(\text{计算值})}''| \\
 &= 1351 - 1302 \\
 &= 49^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{3-41}$$

因为 $\Delta \theta_l'' = 49 < 100^\circ\text{C}$ 所以，符合要求。

炉膛的热力计算使炉膛的经济性、完善性能得到提高，在发电厂的整体的效益中占有重要的部分。一个热损失少的锅炉能够更好的节约燃料，与此同时，更能极大的发挥煤粉式炉膛的优点。

3. 2 后屏过热器热力计算

后屏过热器是屏式过热器的一种，其特点是：后屏过热器的横向截距比对流管束大很多，接近灰熔点的烟气通过它时减少了灰粘结在管子上的机会，有利于防止结渣。烟气通

过后屏烟温下降，也防止了其后的对流管束的结渣。

3. 2. 1、 后屏过热器结构尺寸计算

1、管径及壁厚 $d \times \delta = 54 \times 9mm$ ，（由设计结构可知）。

2、前屏片数 $z_1 = 19$ ，（由设计结构可知）。

3、单片管子根数 $n_1 = 13$ ，（由设计结构可知）。

4、屏的平均高度

$$\begin{aligned} h_{pj} &= (h_{qp} + h_{sy}) \times 0.5 \\ &= (15 + 9.5) \times 0.5 \\ &= 12.25m \end{aligned} \tag{3-42}$$

5、横向截距 $s_1 = 0.7038m$ ，（由设计结构可知）。

6、纵向截距 $s_2^{pj} = 0.0504m$ ，（由设计结构可知）。

7、屏的角系数 $x_{hp} = 0.62$ ，（由设计结构可知）。

8、屏区接受炉膛热辐射面积 $A_{pq}^f = A_{ch} = 234.8m^2$ 。

9、屏的对流受热面积

$$\begin{aligned} A_p &= 2z_1(0.91h_{hp} + h_{pj}) \\ &= 2 \times 19(15 \times 0.91 + 12.25) \\ &= 882m^2 \end{aligned} \tag{3-43}$$

10、屏的计算对流受热面积

$$\begin{aligned} A_p^{js} &= A_p x_{xq} \\ &= 882 \times 0.62 \\ &= 546.7m^2 \end{aligned} \tag{3-44}$$

11、屏区炉顶受热面积

$$\begin{aligned} A_{ld} &= ax_{ld}s_s \\ &= 13.3 \times 1.3 \times 2.43 \\ &= 39.2m^2 \end{aligned} \tag{3-45}$$

12、屏区两侧水冷壁受热面积

$$\begin{aligned}
 A_{cp} &= 2(a \times 0.91 + 0.5h_{pj}) \\
 &= 2(13.3 \times 0.91 + 0.5 \times 12.5) \\
 &= 60.6m^2
 \end{aligned} \tag{3-46}$$

13、屏区附加受热面积

$$\begin{aligned}
 A_{pfi} &= A_{ld} + A_{cq} \\
 &= 39.2 + 60.6 \\
 &= 99.8m^2
 \end{aligned} \tag{3-47}$$

14、屏接受炉膛热辐射面积

$$\begin{aligned}
 A_p^f &= A_{pq}^f \frac{A_p^{js}}{A_p^{js} + A_{fpi}} \\
 &= 546.7 \times \frac{546.7}{234.8 + 99.8} \\
 &= 198.55m^2
 \end{aligned} \tag{3-48}$$

15、炉顶附加受热面辐射面积

$$\begin{aligned}
 A_{pfi}^{fd} &= A_{pq}^f \frac{A_{ld}}{A_p^{js} + A_{fpi}} \\
 &= 546.7 \times \frac{39.2}{234.8 + 99.8} \\
 &= 14.23m^2
 \end{aligned} \tag{3-49}$$

16、水冷壁附加受热面辐射面积

$$\begin{aligned}
 A_{pfi}^{fsl} &= A_{pq}^f \frac{A_{cq}}{A_p^{js} + A_{fpi}} \\
 &= 546.7 \times \frac{60.6}{234.8 + 99.8} \\
 &= 22.01m^2
 \end{aligned} \tag{3-50}$$

17、烟气进屏流通截面积

$$\begin{aligned}
 A_p^i &= (h_{hp} + 2.85)(a + z_1d - 0.06) \\
 &= (15 + 2.85) \times (13.3 + 19 \times 54 - 0.06) \\
 &= 219m^2
 \end{aligned} \tag{3-51}$$

18、烟气出屏流通截面积

$$\begin{aligned}
 A_p^o &= b(a + z_1d - 0.06) \\
 &= 12.2(a + 19 \times 54 - 0.06) \\
 &= 149.7m^2
 \end{aligned} \tag{3-52}$$

19、烟气平均流通截面积

$$\begin{aligned}
 A_{pj} &= \frac{2A_p' A_p''}{A_p' + A_p''} \\
 &= \frac{2 \times 219 \times 149.7}{219 + 149.7} \\
 &= 177.8 m^2
 \end{aligned} \tag{3-53}$$

20、蒸汽流通截面积:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi}{4} d_n^2 n_1 z_1 \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 54^2 \times 13 \times 19 \\
 &= 0.295 m^2
 \end{aligned} \tag{3-54}$$

21、蒸汽质量流速:

$$\begin{aligned}
 \rho\omega &= \frac{(D + D_{jw2})}{3600A} \\
 &= \frac{(1080 + 23.6)}{3600 \times 0.295} \\
 &= 976 m/s
 \end{aligned} \tag{3-55}$$

22、烟气辐射层有效厚度:

$$\begin{aligned}
 s &= 1.8 / \left(\frac{1}{h_{pj}} + \frac{1}{s_1} + \frac{1}{c} \right) \\
 &= 1.8 / \left(\frac{1}{12.25} + \frac{1}{0.7038} + \frac{1}{2.437} \right) \\
 &= 0.978 m
 \end{aligned} \tag{3-56}$$

3. 2. 2、后屏过热器的热力计算

1、烟气平均温度

$$\begin{aligned}
 \theta_{pj} &= \frac{1}{2} (\theta_p' + \theta_p'') \\
 &= \frac{1}{2} \times (1351 + 1001) \\
 &= 1165.5^\circ C
 \end{aligned} \tag{3-57}$$

θ_p' ——烟气进屏温度 $\theta_p' = \theta_t' = 1351^\circ C$ 。

θ_p'' ——烟气出屏温度 $\theta_p'' = 1001^\circ C$ 。假定。

2、屏的对流吸热量

$$\begin{aligned}
 Q_p^d &= \varphi(H_p' - H_p'') - Q_{pfi}^d \\
 &= 0.96 \times (13404.5 - 1024) - 155 \\
 &= 1001 \text{kJ} / \text{kg}
 \end{aligned}
 \tag{3-58}$$

H_p' 、 H_p'' ——分别为烟气的进屏焓、出屏焓。^[2]

Q_{pfi}^d ——屏区附加受热面对流吸热量为 $155 \text{kJ} / \text{kg}$ 。

3、三原子气体辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 K_y &= 10 \left(\frac{0.78 + 1.6r_{H_2O}}{\sqrt{10p_n s}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{T_{pj}}{1000} \right) \\
 &= 10 \times \left(\frac{0.78 + 1.6 \times 0.059}{\sqrt{10 \times 0.0206 \times 0.978}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{9800}{1000} \right) \\
 &= 11.73 \frac{1}{m \square \text{MPa}}
 \end{aligned}
 \tag{3-59}$$

r_{H_2O} ——水蒸汽占烟气容积的份额为 0.059 ，可查附表二，表 VII 得。

4、灰粒的辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 K_h &= 55900 / \sqrt[3]{T_{pj}^2 d_h^2} \\
 &= 55900 / \sqrt[3]{980^2 \times 0.036^2} \\
 &= 92.9 \frac{1}{m \square \text{MPa}}
 \end{aligned}
 \tag{3-60}$$

5、烟气流的辐射减弱系数

$$\begin{aligned}
 K &= K_y r_n + K_h \mu_h \\
 &= 11.37 \times 0.059 + 92.9 \times 0.0289 \\
 &= 5.16 \frac{1}{m \square \text{MPa}}
 \end{aligned}
 \tag{3-61}$$

μ_h ——飞灰浓度为 0.0289 ，可查附表二，表 VII 得

r_n ——三原子气体和水蒸气占的份额为 0.059 ，可查附表二，表 VII 得

6、屏区的烟气黑度

$$\begin{aligned}
 a &= 1 - e^{-K_p s} \\
 &= 1 - e^{-0.432} \\
 &= 0.4
 \end{aligned}
 \tag{3-62}$$

7、屏进口对出口的角系数

$$\begin{aligned}\varphi_p &= \sqrt{\left(\frac{c}{s_1}\right)^2 + 1} - \frac{c}{s_1} \\ &= \sqrt{\left(\frac{2.436}{0.7038}\right)^2 + 1} - \frac{2.436}{0.7038} \\ &= 0.131\end{aligned}\quad (3-63)$$

8、炉膛及屏间烟气对屏后受热面的辐射热量

$$\begin{aligned}Q_p^f &= \frac{Q_p^f(1-a)\varphi_p}{\beta} + \frac{5.67 \times 10^{-11} a A_p^f T_{pj}^4 \zeta_r}{B_j / 3600} \\ &= \frac{1001 \times (1-0.4) 0.131}{0.05} + \frac{5.67 \times 10^{-11} 0.4 \times 288.61 \times 980^4 \times 0.5}{92 / 3600} \\ &= 390.8 \text{ kJ / kg}\end{aligned}\quad (3-64)$$

β ——按 $\beta = 0.02 \sim 0.09$ 选取，这里取 $\beta = 0.05$ 。

A_p^f ——屏出口面积

$$\begin{aligned}A_p^f &= (b + h_{sp})a \\ &= (12.2 + 9.5) \times 13.3 \\ &= 288.61 \text{ m}^2\end{aligned}\quad (3-65)$$

9、屏区炉顶附加受热面吸收的炉膛辐射热量

$$\begin{aligned}Q_{pj}^{fld} &= Q_{pq}^f \frac{A_{pj}^{fld}}{A_{pj}^{fld} + A_{pj}^{fslb} + A_p^f} \\ &= 834.2 \times \frac{14.23}{14.23 + 22.01 + 198.55} \\ &= 58.2 \text{ kJ / kg}\end{aligned}\quad (3-66)$$

Q_{pq}^f ——屏区吸收炉膛的辐射热量

$$\begin{aligned}Q_{pq}^f &= Q_p^f - Q_p^f \\ &= 1232.2 - 398.0 \\ &= 834.2 \text{ kJ / kg}\end{aligned}\quad (3-67)$$

10、屏区水冷壁附加受热面吸收的炉膛辐射热量

$$\begin{aligned}Q_{pj}^{fslb} &= Q_{pq}^f \frac{A_{pj}^{fslb}}{A_{pj}^{fld} + A_{pj}^{fslb} + A_p^f} \\ &= 834.2 \times \frac{22.01}{14.23 + 22.01 + 198.55} \\ &= 111.7 \text{ kJ / kg}\end{aligned}\quad (3-68)$$

11、屏所吸收的炉膛辐射热

$$\begin{aligned}
 Q_p^f &= Q_{pq}^f - Q_{pfj}^{fld} - Q_{pfj}^{fslb} \\
 &= 834 - 58.2 - 150.7 \\
 &= 625.3 \text{kJ} / \text{kg}
 \end{aligned}
 \tag{3-69}$$

12、屏所吸收的总热量

$$\begin{aligned}
 Q_p &= Q_p^d + Q_p^f \\
 &= 1001 + 625.3 \\
 &= 1625.3 \text{kJ} / \text{kg}
 \end{aligned}
 \tag{3-70}$$

13、蒸汽进屏焓

$$\begin{aligned}
 h_p' &= \frac{(D - D_{jw1} - D_{jw2})h_{qp}'' + D_{jw1}h_{js}}{D - D_{jw2}} \\
 &= \frac{(1080 - 21.2 - 25.4) \times 9823 + 21.2 \times 2340.2}{1080 - 23.6} \\
 &= 2927 \text{kJ} / \text{kg}
 \end{aligned}
 \tag{3-71}$$

14、蒸汽出屏焓

$$\begin{aligned}
 h_p'' &= h_p' + Q_p \frac{B_j}{D - D_{jw2}} \\
 &= 2927 + 1805.2 \times \frac{92}{1080 - 25.4} \\
 &= 3392 \text{kJ} / \text{kg}
 \end{aligned}
 \tag{3-72}$$

15、屏内蒸汽平均流速

$$\begin{aligned}
 \omega &= \frac{(D - D_{jw})v_{pj}}{3600A} \\
 &= \frac{(1080 - 48.6) \times 0.0167}{3600 \times 0.295} \\
 &= 21 \text{m} / \text{s}
 \end{aligned}
 \tag{3-73}$$

v_{pj} ——屏内蒸汽平均比容得 $0.0167 \text{kJ} / \text{kg}$ 。^[2]

16、屏间烟气平均流速

$$\begin{aligned}
 \omega_y &= B_j V_y (\theta_{pj} + 273) / (273 + 3600 A_{pj}) \\
 &= 92 \times 8.328 \times (482 + 273) / (273 + 3600 \times 2980) \\
 &= 7.85 \text{m} / \text{s}
 \end{aligned}
 \tag{3-74}$$

17、管壁灰污层温度

$$\begin{aligned}
 t_{hb} &= t^{pj} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \frac{B_j Q_p}{A_p^{js}} \\
 &= 482 + \left(0.006 + \frac{1}{4938}\right) \times \frac{92 \times 1805.2}{546.7} \\
 &= 1138.6^\circ C
 \end{aligned} \tag{3-75}$$

α_2 ——管壁对蒸汽的放热系数为 $4938 W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ 。^[3]

ε ——灰污系数为 0.006 。^[3]

18、对流传热系数

$$\begin{aligned}
 k &= \alpha_1 / \left[1 + \left(1 + \frac{Q_p^f}{Q_p^d}\right) \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right) \alpha_1\right] \\
 &= 193 / \left[1 + \left(1 + \frac{1001}{3364}\right) \times \left(0.006 + \frac{1}{4938}\right) \times 193\right] \\
 &= 72 W / (m^2 \cdot ^\circ C)
 \end{aligned} \tag{3-76}$$

19、屏对流传热量

$$\begin{aligned}
 Q_p^{cr} &= 3.6k \Delta t A_p^{js} / B_j \\
 &= 3.6 \times 72 \times 714.8 \times 546.7 / 92 \\
 &= 1176^\circ C
 \end{aligned} \tag{3-77}$$

20、屏区两侧水冷壁对流吸热量

$$\begin{aligned}
 Q_{pc}^d &= \frac{3.6K \Delta t A_{cq}}{B_j} \\
 &= \frac{3.6 \times 72 \times 715 \times 60.6}{92} \\
 &= 120.4 kJ / kg
 \end{aligned} \tag{3-78}$$

Δt ——平均传热温差，

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= \theta_{pj} - t_{bs} \\
 &= 1165.5 - 450.5 \\
 &= 715^\circ C
 \end{aligned} \tag{3-79}$$

21、误差

$$\begin{aligned}
 \Delta Q &= (Q_{pfi}^{slb} - Q_{pc}^d) / Q_{pfi}^{slb} \times 100 \\
 &= (111.8 - 120.4) / 111.8 \times 100 \\
 &= -7.6\%
 \end{aligned} \tag{3-80}$$

22、屏区炉顶进口汽焓

$$\begin{aligned}
 h'_{pld} &= h''_{bq} + \frac{Q_{ld} B_j}{D - D_{jw1} - D_{jw2}} \\
 &= 2592 + \frac{9620.3 \times 92}{1080 - 23.2 - 25.4} \\
 &= 2754.1 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned} \tag{3-81}$$

23、屏区炉顶蒸汽焓增量

$$\begin{aligned}
 \Delta h_{pld} &= B_j (Q_{pfi}^{fd} + Q_{pfi}^{ld}) / (D - D_{jw1} - D_{jw2}) \\
 &= 92 \times (58.2 + 49.67) / (1080 - 23.2 - 25.4) \\
 &= 18.1 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned} \tag{3-82}$$

24、屏区炉顶出口汽焓

$$\begin{aligned}
 \Delta h_{plf}'' &= h'_{pld} + \Delta h_{pld} \\
 &= 2754.1 + 18.1 \\
 &= 2772.2 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned} \tag{3-83}$$

25、平均传热温差

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= \theta_{pi} - \frac{1}{2} (t'_{pld} + t''_{pld}) \\
 &= 1165.5 - \frac{1}{2} \times (367 + 378) \\
 &= 801.9^\circ \text{C}
 \end{aligned} \tag{3-84}$$

26、屏区炉顶对流吸热量

$$\begin{aligned}
 Q_{pld} &= 3.6 k A_{ld} \Delta t / B_j \\
 &= 3.6 \times 72 \times 39.2 \times 801.9 / 92 \\
 &= 88.46 \text{ kJ / kg}
 \end{aligned} \tag{3-85}$$

27、误差

$$\begin{aligned}
 \Delta Q &= (Q_{pfi}^{ld} - Q_{pld}^d) / Q_{pfi}^{ld} \times 100 \\
 &= (83.2 - 88.46) / 83.2 \times 100 \\
 &= -5.1\%
 \end{aligned} \tag{3-86}$$

通过锅炉燃烧系统的设计和锅炉热力计算，得出结论是锅炉的设计能够使燃料燃烧的比较完全，同时又能保证燃烧室能够长期有效的运行，不会因为严重的结渣等事故而被迫停产。

煤粉炉的燃烧设备包括煤粉燃烧器、点火装置和炉膛。煤粉燃烧器也称为喷燃器。它是煤粉炉燃烧设备的主要组成部分，其作用是：将携带煤粉的一次风和助燃的二次风送入炉膛，并组织一定的气流结构，使煤粉能迅速稳定的着火；同时使煤粉和空气合理混合，

达到煤粉在炉内迅速完全燃烧。燃烧器的性能，对燃烧器的稳定性和经济性有很大的影响。

炉膛是燃烧系统的重要组成部分，合理的设计炉膛就能够提高燃烧系统的燃烧效率，从而达到节约燃料提高经济性的目的。炉膛的设计要从燃料的选择开始，炉膛必须能适合燃料燃烧的要求，使燃料充分的燃烧；其次是锅炉产生的蒸汽能够满足整座电厂的需求。

过热器是锅炉中将蒸汽变成过热蒸汽的设备，尤其是炉膛上部的屏式过热器，不仅能够吸收炉膛内的辐射能量，还能够吸收烟气的对流放热。屏式过热器吸收炉膛内相当数量的辐射热量，适应大容量高参数锅炉过热器吸热量相对增加、水冷壁吸热量相对减少的需要，他补充了水冷壁吸收炉膛辐射热的不足，实现了炉膛必需的辐射传热量，并把炉膛出口烟气温度限制在合理范围内。燃烧器四角布置切圆燃烧方式的炉膛，由于炉内气流的旋转运动，在炉膛出口处会发生流动偏转、速度分布不均、烟温左右偏差。屏式对烟气流的偏移能起到阻尼和导流作用。

毕业设计通过对锅炉燃烧系统的设计，能够对锅炉等设备进行设计校核，保证设备的安全性和经济性。

附录一

附表一 燃料消耗量计算及热平衡用表

大同煤炭职业技术学院

表 I 1Nm^3 空气和烟气焓 (kJ/Nm^3) 及 1kg 灰的焓 (kJ/kg)

| $\theta(^{\circ}\text{C})$ | $(c\theta)_{\text{CO}_2}$ | $(c\theta)_{\text{N}_2}$ | $(c\theta)_{\text{CO}}$ | $(c\theta)_{\text{O}_2}$ | $(c\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$ | $(c\theta)_k$ | $(c\theta)_h$ |
|----------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|
| 100 | 170 | 130 | 130 | 132 | 151 | 132 | 81 |
| 200 | 358 | 260 | 261 | 267 | 305 | 266 | 169 |
| 300 | 559 | 392 | 395 | 407 | 463 | 403 | 264 |
| 400 | 772 | 527 | 532 | 551 | 626 | 542 | 360 |
| 500 | 994 | 664 | 671 | 699 | 795 | 684 | 458 |
| 600 | 1225 | 804 | 814 | 850 | 969 | 830 | 561 |
| 700 | 1462 | 948 | 960 | 1004 | 1149 | 978 | 663 |
| 800 | 1705 | 1094 | 1109 | 1160 | 1334 | 1129 | 768 |
| 900 | 1952 | 1242 | 1260 | 1318 | 1526 | 1282 | 874 |
| 1000 | 2201 | 1392 | 1413 | 1478 | 1723 | 1437 | 984 |
| 1100 | 2458 | 1544 | | 1638 | 1925 | 1595 | 1096 |
| 1200 | 2717 | 1697 | 1723 | 1801 | 2132 | 1753 | 1206 |
| 1300 | 2977 | 1853 | | 1964 | 2344 | 1914 | 1360 |
| 1400 | 3239 | 2009 | 2039 | 2128 | 2559 | 2076 | 1571 |
| 1500 | 3503 | 2166 | | 2294 | 2779 | 2239 | 1758 |
| 1600 | 3769 | 2325 | 2359 | 2461 | 3002 | 2403 | 1830 |
| 1700 | 4036 | 2484 | | 2629 | 3229 | 2567 | 2066 |
| 1800 | 4305 | 2644 | 2682 | 2797 | 3458 | 2932 | 2184 |
| 1900 | 4574 | 2804 | | 2967 | 3690 | 2899 | 2385 |
| 2000 | 4844 | 2965 | 3008 | 3138 | 3926 | 3066 | 2512 |
| 2100 | 5115 | 3128 | | 3309 | 4163 | 3234 | 2640 |
| 2200 | 5387 | 3289 | 3335 | 3483 | 4402 | 3402 | 2760 |
| 2300 | 5659 | 3452 | | 3656 | 4644 | 3571 | |
| 2400 | 5930 | 3615 | 3682 | 3831 | 4887 | 3740 | |
| 2500 | 6203 | 3779 | | 4007 | 5132 | 3910 | |

表 II 锅炉飞灰份额 α_{fh} 与炉渣份额 α_{lz} 的推荐值

| 锅炉型式 | | α_{fh} | α_{lz} |
|---------|----------|---------------|---------------|
| 固态排渣煤粉炉 | | 0.90~0.95 | 0.05~0.10 |
| 液态排渣炉 | 开式炉 | 无烟煤 | 0.85 |
| | | 贫煤 | 0.80 |
| | | 烟煤 | 0.80 |
| | | 褐煤 | 0.70~0.80 |
| | 带缩腰的半开式炉 | 无烟煤 | 0.85 |
| | | 贫煤 | 0.80 |
| | | 烟煤 | 0.70~0.80 |
| | | 褐煤 | 0.60~0.70 |
| 卧式旋风炉 | | 0.10~0.15 | 0.85~0.90 |

表 III 电站锅炉的 q_4 一般数据

| 炉子型式 | 煤种 | q_4 (%) | 备注 |
|---------|-----|-----------|----------------|
| 固态排渣煤粉炉 | 无烟煤 | 4~6 | 挥发分高者 q_4 较小 |
| | 贫煤 | 2 | |
| | 烟煤 | 1~1.5 | 灰分高者 q_4 较大 |
| | 褐煤 | 0.5~1 | 灰分高者 q_4 较大 |
| 液态排渣煤粉炉 | 无烟煤 | 3~4 | |
| | 贫煤 | 1~1.5 | |
| | 烟煤 | 0.5 | |
| | 褐煤 | 0.5 | |
| 卧式旋风炉 | 烟煤 | 1 | |
| | 褐煤 | 0.2 | |

附表二 炉膛设计用表

表 I 炉膛容积热强度的推荐值 (kW/m³)

| 燃料种类 | 固态排渣炉 | 液态排渣炉 | 燃料种类 | 固态排渣炉 | 液态排渣炉 |
|------|---------|---------|------|---------|---------|
| 无烟煤 | 110~140 | 145/169 | 烟煤 | 140~198 | 186/198 |
| 贫煤 | 116~163 | 151/198 | 褐煤 | 93~151 | |

表 II 炉膛断面热强度推荐值 (kW/m²)

| 锅炉容量 (t/h) | 220 | 400~410 | 670 | 1000 |
|----------------|---------|---------|---------|-------|
| q _v | 2.1~3.5 | 2.8~4.5 | 3.3~4.7 | 4.3~5 |

表 III 煤粉炉常用的煤粉燃烧器种类

| 煤种 | 煤的可燃基挥发分 (%) | 煤粉燃烧器类型 |
|--------|--------------|-----------|
| 贫煤或无烟煤 | 10~20 | 角置直流式 |
| 烟煤或褐煤 | 20~40 | 角置直流式或旋留式 |
| 烟煤或褐煤 | >40 | 旋流式 |

表 IV 一次风速和二次风速的推荐值 (m/s)

| 燃烧器型式 | | 无烟煤 | 贫煤 | 烟煤 | 褐煤 |
|--------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 旋流式燃烧器 | 一次风 | 12~16 | 16~20 | 20~25 | 20~26 |
| | 二次风 | 15~22 | 20~25 | 30~40 | 25~35 |
| 直流式燃烧器 | 一次风 | 20~25 | 20~25 | 25~35 | 18~30 |
| | 二次风 | 45~55 | 45~55 | 40~55 | 40~60 |
| 三次风 | | 50~60 | 50~60 | | |

大同煤炭职业技术学院

表 V 一次风率 (%)

| 煤 种 | 无烟煤 | 贫 煤 | 烟 煤 | | 褐 煤 |
|------|-------|-------|-----------------|--------------|-------|
| | | | $V^r \leq 30\%$ | $V^r > 30\%$ | |
| 乏气送粉 | | 20~25 | 25~30 | 25~35 | 20~45 |
| 热风送粉 | 20~25 | 20~25 | 25~40 | | |

表 VI 空气平衡表

| 受热面名称 过量空气系数 | 炉膛, 后 屏过热器 | 对流过热 器 | 高温再热 器 | 低温再热 器, 旁路 省煤器 | 主省煤器 | 空气预 热器 |
|-----------------|---------------|-----------|-----------|----------------------|-------|-----------|
| 进 口 | | 1. 20 | 1. 25 | 1. 28 | 1. 31 | 1. 34 |
| 漏 风 | 0. 05 | 0. 05 | 0. 03 | 0. 03 | 0. 03 | 0. 2 |
| 出 口 | 1. 20 | 1. 25 | 1. 25 | 1. 28 | 1. 34 | 1. 54 |

大同煤炭职业技术学院

表 VII

烟气特性表

| 名称及公式 | 符号 | 单位 | l, hp | d lgr | g zr | d zr, p sm | s m | k y |
|---|-----------------|-------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|
| 烟道进口处过量空气系数 | α' | | 1.2 | 1.2 | 1.25 | 1.28 | 1.31 | 1.34 |
| 烟道出口处过量空气系数 | α'' | | 1.2 | 1.25 | 1.28 | 1.31 | 1.34 | 1.54 |
| 烟道间平均过剩空气系数 | α_{pj} | | 1.2 | 1.225 | 1.265 | 1.295 | 1.325 | 1.44 |
| 过剩空气量 $(\alpha_{pj} - 1)V^\circ$ | ΔV | Nm^3 / kg | 1.282 | 1.442 | 1.699 | 1.899 | 2.083 | 2.82 |
| H_2O 容积 $V_{H_2O}^\circ + 0.0161(\alpha_{pj} - 1)V^\circ$ | V_{H_2O} | Nm^3 / kg | 0.4816 | 0.4842 | 0.4883 | 0.4914 | 0.4945 | 0.5064 |
| 烟气总容积 $V_{H_2O}^\circ + V_{N_2}^\circ + V_{RO_2} + (\alpha_{pj} - 1)V^\circ$ | V_y | Nm^3 / kg | 8.0284 | 8.1912 | 8.4526 | 8.6552 | 8.8426 | 9.5912 |
| RO_2 容积比 V_{RO_2} / V_y | γ_{RO_2} | | 0.1504 | 0.147 | 0.1429 | 0.1395 | 0.1366 | 0.1259 |
| H_2O 容积比 V_{H_2O} / V_y | γ_{H_2O} | | 0.0599 | 0.0591 | 0.0578 | 0.0568 | 0.0559 | 0.0528 |
| 三原子气体容积比 $\gamma_{RO_2} + \gamma_{H_2O}$ | γ_n | | 0.2103 | 0.2061 | 0.2007 | 0.1963 | 0.1925 | 0.1787 |
| 烟气质量 | G_y | | 10.7987 | 10.9231 | 11.1356 | 11.3655 | 11.5981 | 11.7144 |
| 飞灰浓度 $\frac{A^y \alpha}{100V_y \rho_y^\circ}$ | μ_h | kg / kg | 0.0289 | 0.0276 | 0.0263 | 0.0251 | 0.0239 | 0.2227 |

表 VIII 蒸发量 $\geq 76\text{t/h}$ 固态排渣煤粉炉炉膛计算特性

| 燃料种类 | α_i'' | q_3 (%) | q_4 (%) | α_{fh} | q_v (W/m^3) |
|------|--------------|-----------|-----------|---------------|----------------------------|
| 无烟煤 | 1.2~1.25 | 0 | 6~4 | 0.95 | $116 \sim 151 \times 10^3$ |
| 贫煤 | 1.2~1.25 | 0 | 2 | 0.95 | $116 \sim 163 \times 10^3$ |
| 烟煤 | 1.2 | 0 | 1~1.5 | 0.95 | $140 \sim 198 \times 10^3$ |
| 褐煤 | 1.2 | 0 | 0.5~1 | 0.95 | $93 \sim 151 \times 10^3$ |

附录二

[1] 可由《300 MW 火发电机组丛书——第一分册》中查得。

[2] 可由《电厂锅炉》焓熵图中查得。

[3] 可由《锅炉课程设计》中查得。

致谢

经过两个月的辛苦和努力，终于圆满完成了本次毕业设计。通过毕业设计，对电厂锅炉燃烧系统，有了深刻的理解。尤其对电厂锅炉各种设备的选择有了全面的了解。这次设计是把自己大学所学知识的具体的应用和检验。对自己将来更好的工作打下了良好的基础。

在这次毕业设计的过程当中，我得到了许多老师和同学的热心帮助，特别是武月枝老师在百忙中抽出时间来指导我的毕业设计，提供参考资料，认真地审查毕业设计，并提出了很多有参考价值的意见。在此向在设计中给予我帮助的单位，老师，同学致谢！

由于时间仓促，没有实际经验。因此难免有错误之处。恳请各位老师及专家批评，指正。

参考文献

- 1、从振主编。锅炉原理。北京：水利电力出版社，1986
- 2、陈学俊，陈昕宽，锅炉原理，第二版。北京：机械工业出版社，1991
- 3、林宗虎，张永照。锅炉手册。北京：机械工业出版社，1989
- 4、岑可法，樊建人。燃烧流体力学。北京：水利电力出版社，1991
- 5、徐通模等。锅炉燃烧设备。西安：西安交通大学出版社，1990
- 6、西安电力学校。火力发电厂高压锅炉及运行。北京：水利电力出版社，1979
- 7、华中理工大学。华中华能武汉阳逻电厂。1025/h 亚临界自然循环锅炉机组。武汉（内部资料）1993
- 8、姜珍璋，曹凯旋。1025/h 亚临界控制循环锅炉。广东（内部资料），1990
- 9、湖北汉川电厂。锅炉设备。湖北（内部资料）
- 10、李长青。锅炉。湖南（内部资料）1990
- 11、武汉水利电力学院。锅炉设备。湖北（内部资料）1984
- 12、丁尔谋主编。发电厂低循环倍率塔式锅炉。北京：中国电力出版社，1996
- 13、容奎恩等。电站锅炉原理。北京：中国电力出版社，1997
- 14、郑体宽主编。热力发电厂。北京：水利电力出版社，1995