

“鍋炉設備”系根据1961年高等教材會議的决定由南京工学院編写的教材，分上下两册出版，本书为下册。主要内容系阐述炉内傳热、对流受热面傳热、鍋炉受热面的布置等有关的理論和热力計算，自然循环的理論，直流鍋炉和強制循环鍋炉的工作原理，对蒸汽品质与鍋炉給水的要求，鍋炉强度計算，鍋炉机组的結構和附件，鍋炉通风計算等。对于鍋炉机组的运行以及鍋炉机组的发展方向，也作了扼要的敘述。

本书适用于高等院校各有关专业作为教材或教学参考书。

鍋 炉 設 备

下 册

范从振 章臣樾 周强太 合編

南京工学院发电厂热力設備教研組校訂

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南書房)

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $16^{1/4}$ ·字数371,000

1961年12月北京第一版·1962年5月北京第二次印刷

印数1,821—4,920·定价(10-6)1.90元

*

統一书号: K15165·1147(水电-174)

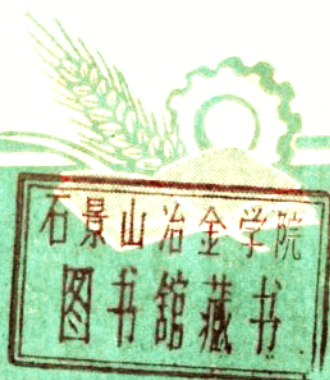
高等学校交流讲义

鍋 炉 設 备

下 册

范从振 章臣樾 周强太 合編
南京工学院发电厂热力設備教研組校訂

只限学校内部使用



中国工业出版社

前 言

本书下册由范从振、章臣樾和周强太同志编写。第十五、十六、十九、二十和二十三章由范从振同志编写，第十二、十三、十四、二十一和二十二章由章臣樾同志编写，第十七、十八章和附录由周强太同志编写。

关于液态排渣旋风炉的热力计算问题，虽然这方面已经积累了大量研究资料，但是，由于对该问题的研究还不很成熟，所以在本书中暂时作为附录，以供参考。

南京工学院发电厂热力设备教研组

1961年7月

目 录

前 言

第十二章 炉内传热计算..... 5

- 第一节 炉内传热计算公式..... 5
- 第二节 炉子黑度..... 10
- 第三节 辐射受热面..... 15
- 第四节 炉内传热计算公式的讨论..... 17

第十三章 对流受热面传热计算..... 19

- 第一节 平均温压..... 19
- 第二节 传热系数..... 23
- 第三节 对流放热系数..... 25
- 第四节 烟气在对流受热区的辐射放热系数..... 32
- 第五节 对流受热面的灰污系数和利用系数..... 35

第十四章 锅炉受热面的布置和热计算..... 36

- 第一节 锅炉整体布置..... 36
- 第二节 炉膛的布置及其出口烟气温度的选定..... 41
- 第三节 锅炉排烟温度和尾部受热面分配布置的确定..... 43
- 第四节 对流受热面中烟气和空气经济流速的选择..... 46
- 第五节 锅炉热计算的目的和方法..... 48
- 第六节 热计算方法的若干要点..... 50

第十五章 自然循环..... 56

- 第一节 受热管子的温度..... 56
- 第二节 两相流动的规律..... 57
- 第三节 工质的流动阻力..... 64
- 第四节 自然循环原理..... 67
- 第五节 循环回路的流动计算..... 68
- 第六节 自然循环安全指标..... 75
- 第七节 自然循环系统的合理布置..... 80

第十六章 直流锅炉和强制循环..... 85

- 第一节 直流锅炉工作原理..... 85
- 第二节 直流锅炉的类型..... 87
- 第三节 蒸发管中工质的流动特性..... 90
- 第四节 管子间的脉动..... 94
- 第五节 上下曲折管中的流动..... 95
- 第六节 关于过渡区的问题..... 98
- 第七节 直流锅炉设计的特点..... 100
- 第八节 多次强制循环锅炉..... 103

第十七章 蒸汽品质..... 106

- 第一节 对蒸汽品质的要求..... 106
- 第二节 蒸汽污染的原因..... 107
- 第三节 汽水分离装置..... 116
- 第四节 蒸汽清洗设备..... 123
- 第五节 锅炉的排污..... 125
- 第六节 分段蒸发..... 127

第十八章 锅炉水..... 131

- 第一节 水质指标..... 131

- 第二节 水垢的生成..... 133
- 第三节 受热面的内部腐蚀..... 135
- 第四节 锅炉的给水..... 137
- 第五节 补充水的处理..... 138
- 第六节 汽鼓锅炉的水工况..... 146
- 第七节 直流锅炉的水工况..... 149

第十九章 锅炉部件的强度计算..... 151

- 第一节 受热面金属的工作情况..... 151
- 第二节 钢的高温腐蚀..... 154
- 第三节 受热面金属的热应力..... 155
- 第四节 锅炉用钢..... 159
- 第五节 金属壁的计算温度..... 162
- 第六节 许可应力的选定..... 166
- 第七节 长圆筒汽鼓的强度计算公式..... 168
- 第八节 圆筒形联箱的强度计算..... 170
- 第九节 受内压力钢管的强度计算..... 171
- 第十节 凸形顶板的强度计算..... 171

第二十章 锅炉通风及通风计算..... 173

- 第一节 通风的作用和方式..... 173
- 第二节 气体流动阻力的计算..... 174
- 第三节 自身引风..... 177
- 第四节 烟囱和自然通风..... 178
- 第五节 机械通风设备..... 180

第二十一章 锅炉机组的结构和附件..... 183

- 第一节 锅炉构架..... 183
- 第二节 炉墙材料..... 189
- 第三节 锅炉砖工..... 193
- 第四节 排渣设备..... 204
- 第五节 锅炉机组的附件..... 206

第二十二章 锅炉机组的运行..... 214

- 第一节 启动和停炉..... 214
- 第二节 直流锅炉的升火和停炉系统..... 218
- 第三节 锅炉——汽机单元机组的启动和停止..... 219
- 第四节 负荷的分配..... 223
- 第五节 正常运行..... 226
- 第六节 非额定工况运行..... 229

第二十三章 锅炉机组的发展动向..... 233

- 第一节 大容量、高温、高压机组的发展..... 233
- 第二节 锅炉结构的发展趋向..... 236
- 第三节 燃烧方式..... 244

附录 旋风炉的热力计算..... 248

- 一、卧式旋风炉的结构尺寸和计算特性..... 248
- 二、卧式旋风炉的热力计算方法..... 249
- 三、立式旋风炉的结构尺寸和热力计算..... 251
- 四、立式旋风炉的热力计算方法..... 255
- 五、结束语..... 257

复习提要..... 258

第十二章 炉内传热计算

在锅炉的炉膛内，既进行着燃烧过程，同时又进行着传热的过程。燃料燃烧后所放出的热量以辐射和对流两种方式经受热面传递给水和蒸汽。由于燃烧着的燃料和燃烧产物的温度很高，所以对周围水冷壁的辐射放热非常强烈；但炉内的烟气则仅以较低的速度与水冷壁管接触，所以对流放热是很少的。在一般锅炉的炉膛里，对流传热量只约占炉内总传热量的5%。因此，所谓炉内传热计算，实质上就是在燃烧条件下的辐射传热计算，而不必单独考虑对流传热。至于炉膛以后的对流受热面，如对流管束、过热器、省煤器和空气预热器等，主要是以对流传热的方式吸取燃烧产物所带的热量。炉膛传热计算方法和对流受热面传热的计算方法是完全不一样的。它们将在本章和下一章分别予以说明。

第一节 炉内传热计算公式

炉内传热计算的任务是下列两者之一：

- (1) 根据选定的炉膛出口处的烟气温度，求出炉膛内所需布置的辐射受热面；
- (2) 根据已布置的炉膛辐射受热面，核算炉子出口处的烟气温度。

从这两个任务可以看出：炉膛传热计算的目的是要确定炉膛辐射受热面的面积及其吸热量之间的关系。由于这关系受到很多因素的影响，所以炉内传热计算是很复杂的。在苏联，炉内传热计算方法的研究沿着两个不同的方向发展：以相似理论为基础的經驗方法和分析计算方法。

苏联锅炉汽轮机研究所(ЦКТИ)和全苏热工研究所(ВТИ)1957年联合公布的“锅炉机组热力计算标准方法”中的炉内传热计算公式，就是以相似理论和大量试验数据为基础而制定的。此法在我国已被广泛地采用，也是本章主要说明的内容。

根据热平衡的概念，以1公斤燃料为准的炉内有效发热量 Q_m 为：

$$Q_m = Q_p \frac{100 - q_2 - q_3}{100} + Q_B - Q_{B \cdot B_{\text{нм}}} + \tau I_{\text{г.омс}} \text{ 千卡/公斤,} \quad (12-1)$$

式中 Q_p ——随同1公斤燃料进入锅炉机组的热量，千卡/公斤（参阅本书第四章）；

q_2 和 q_3 ——化学不完全燃烧热损失和灰渣物理热与水冷却所引起的热损失，%；

Q_B ——空气带进炉子里的热量，其值为：

$$Q_B = (\alpha_m - \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_{\text{н.л.в}}) I_B'' + (\Delta\alpha_m + \Delta\alpha_{\text{н.л.в}}) I_{\text{х.в}} \text{ 千卡/公斤。}$$

其中 α_m 为炉膛出口处的过剩空气系数； $\Delta\alpha_m$ 和 $\Delta\alpha_{\text{н.л.в}}$ 为炉膛和制粉系统中的漏风系数； I_B'' 和 $I_{\text{х.в}}$ 为空气预热器出口温度下和冷空气温度下的理论空气的焓；

$Q_{B \cdot B_{\text{нм}}}$ ——空气在锅炉机组外受热时，随同空气带来的热量，千卡/公斤；

$\tau I_{\text{г.омс}}$ ——相应于每公斤燃料从锅炉烟道中抽出来再送入炉内的烟气体积 τ 与该烟气的焓 $I_{\text{г.омс}}$ 的乘积，亦即再循环烟气带进炉内的热量。对于没有再循环装置的锅炉，当然不必考虑这项热量。

应该说明：(12-1)式中减去 $Q_{B \cdot B_{\text{нм}}}$ 的原因是为了在 Q_p 和 Q_B 中重复的包括了这部分

热量。同时在該式中未考虑机械不完全燃烧损失 q_4 ，这是因为在锅炉的热計算中是按計算燃料消耗量来进行的。

炉內的有效发热量一部分被辐射受热面吸收，另一部分則被烟气帶出炉膛。炉內辐射放热量可表示为：

$$Q_A = \varphi(Q_m - I_m'') \text{ 千卡/公斤} \quad (12-2)$$

式中 Q_A ——炉內辐射放热量，千卡/公斤；

I_m'' ——相应于炉膛出口烟温 ϑ_m'' 和炉膛出口过剩空气系数 α_m 条件下的烟气的焓，千卡/公斤；

φ ——考虑散热损失的保热系数， $\varphi = 1 - \frac{q_4}{100}$ 。

炉內有效发热量 Q_m 和炉膛出口烟气焓也可用相应的温度 ϑ 、比热 C 和烟气容积 V 来表示：

$$Q_m = V_1(C\vartheta)_a,$$

$$I_m'' = V_1(C\vartheta)_m'',$$

式中 $(C\vartheta)_a$ ——在理論燃烧温度(即絕热燃烧时的温度，°C)下，每标准米³烟气的焓；

$(C\vartheta)_m''$ ——在炉膛出口温度 ϑ_m'' °C下，每标准米³烟气的焓。

如锅炉計算燃料消耗量为 B_p 公斤/小时，則每小时炉內辐射放热量为：

$$\varphi B_p(Q_m - I_m'') = \varphi B_p V C_{cp}(\vartheta_a - \vartheta_m'') \text{ 千卡/小时}, \quad (12-3)$$

式中 $V C_{cp}$ ——1公斤燃料的燃烧产物在 ϑ_a °C和 ϑ_m'' °C的温度間隔內的平均热容，千卡/公斤°C，其值为，

$$V C_{cp} = \frac{Q_m - I_m''}{\vartheta_a - \vartheta_m''} = \frac{V_1(C\vartheta)_a - V_1(C\vartheta)_m''}{\vartheta_a - \vartheta_m''}. \quad (12-4)$$

以上是根據热平衡的概念得出的炉內辐射传热量的表达式。另一方面，根据辐射传热原理，辐射受热面 H_A 每小时的辐射吸热量为：

$$B_p Q_A = \sigma_0 a_m H_A (T_{\varphi}^4 - T_{cm}^4) \text{ 千卡/小时}, \quad (12-5)$$

式中 σ_0 ——绝对黑体的辐射常数，其值为 4.9×10^{-8} ；

a_m ——炉子黑度；

H_A ——炉內辐射受热面，米²；

T_{φ} ——火焰平均有效绝对温度，°K；

T_{cm} ——受热面表面的绝对温度，°K。

根据(12-3)和(12-5)两式，即可写出平衡关系式：

$$4.9 \times 10^{-8} a_m H_A (T_{\varphi}^4 - T_{cm}^4) = \varphi B_p V C_{cp}(\vartheta_a - \vartheta_m''), \quad (12-6)$$

而

$$\vartheta_a - \vartheta_m'' = T_a - T_m'',$$

故得：

$$4.9 \times 10^{-8} a_m H_A (T_{\varphi}^4 - T_{cm}^4) = \varphi B_p V C_{cp} (T_a - T_m''). \quad (12-6a)$$

(12-6a)式两边以 T_a 除之，并引入无因次温度：

$$\theta_{\varphi} = \frac{T_{\varphi}}{T_a}, \text{ 称为无因次火焰平均有效温度,}$$

$$\theta_{cm} = \frac{T_{cm}}{T_a}, \text{ 称为无因次受热面表面温度,}$$

$\theta_m'' = \frac{T_m''}{T_a}$, 称为无因次炉子出口温度,

即得

$$4.9 \times 10^{-8} a_m H_a T_a^3 \left[1 - \frac{\theta_{\phi}^4}{\theta_m^4} \right] \theta_{\phi}^4 = \varphi B_p V C_{cp} (1 - \theta_m''). \quad (12-6b)$$

式中 $1 - \frac{\theta_{\phi}^4}{\theta_m^4} = 1 - \frac{T_{\phi}^4}{T_m^4}$, 表示受热面反向辐射(从受热面向火焰的辐射)影响的系数, 并以符号 ζ 代替。这系数称为假想的污染系数。因而(12-6b)式即可整理为:

$$\frac{4.9 \times 10^{-8} a_m \zeta H_a T_a^3}{\varphi B_p V C_{cp}} \cdot \theta_{\phi}^4 + \theta_m'' - 1 = 0, \quad (12-7)$$

式中无因次量

$$Bo = \frac{\varphi B_p V C_{cp}}{4.9 \times 10^{-8} \zeta H_a T_a^3},$$

称为波尔茨曼准则, 故公式(12-7)可写成:

$$\frac{a_m}{Bo} \theta_{\phi}^4 + \theta_m'' - 1 = 0. \quad (12-7a)$$

在上式中最复杂的问题是火焰平均有效温度, 因为在炉膛内, 各处烟气温度是不同的, 靠近火焰燃烧中心处, 烟气温度最高; 而在受热面附近, 由于烟气的强烈放热, 故温度降低; 当烟气离开火焰中心沿炉膛上升时, 由于放热而冷却, 故炉膛出口的温度已降低很多。因此, 所谓火焰平均有效温度 T_{ϕ} , 乃一假想的、用以计算炉内辐射传热量的温度, 它既不是燃料理论燃烧温度, 也不是炉子出口处的烟气温度。但是它与两者有密切的关系。它们之间的关系, 与许多因素(首先是与炉内温度场)有关。这个关系可通过某些系数和指数方程表示出来,

$$\theta_{\phi} = C' (\theta_m'')^n,$$

则(12-7a)式就变为:

$$\frac{Ca_m}{Bo} (\theta_m'')^{4n} + \theta_m'' - 1 = 0. \quad (12-8)$$

这样, 从公式(12-8), 可以得到炉子出口处无因次温度 θ_m'' 、波尔茨曼准则和炉子黑度之间的函数关系式:

$$\theta_m'' = f\left(\frac{Bo}{Ca_m}, n\right), \quad (12-8a)$$

式中系数 C 和 n 是考虑平均有效温度 T_{ϕ} 与燃料理论燃烧温度 T_a 和炉子出口温度 T_m'' 之间关系的系数。

苏联 A.M. 古尔维奇根据相似理论和大量试验综合整理的资料, 得到用以计算炉膛出口无因次温度的公式:

$$\frac{\theta_m''}{1 - \theta_m''} = \frac{1}{m} \left(\frac{Bo}{Ca_m} \right)^{0.8} \quad (12-9)$$

或

$$\theta_m'' = \frac{Bo^{0.8}}{Ma_m^{0.8} + Bo^{0.8}}, \quad (12-9a)$$

该公式适用于 $Bo < 10a_m$ 或 $\theta_m'' < 0.9$ 的情况。

式中系数 M 在一定燃料和一定炉子型式的条件下, 是一个常数。对于下列情况, 采

取 $M=0.445$;

- (1) 燃烧任何固态燃料的固态排渣煤粉炉;
- (2) 重油炉和气体炉;
- (3) 燃烧除无烟煤外, 其他燃料的层燃炉或火焰——层燃炉。

在 $M=0.445$ 的情况下, 把波尔茨曼准则代入公式(12-9a)并化简后, 即得计算炉子出口温度(如辐射受热面已知)或计算炉膛辐射受热面(如炉子出口烟温已定)的公式:

$$\delta_m'' = \frac{T_a}{\left(\frac{1.27 \times 10^{-8} \zeta a_m T_a^3}{\varphi B_p V C_{cp}} \right)^{0.6}} - 273^\circ \text{C}, \quad (12-10)$$

$$\Pi_A = 0.79 \cdot 10^{-8} \frac{B_p Q_A}{\zeta a_m T_m'' T_a^3} \sqrt[3]{\left(\frac{T_a}{T_m''} - 1 \right)^2} \text{ 米}^2. \quad (12-10a)$$

图12-1为根据公式(12-10)和(12-10a)所作的计算曲线图。

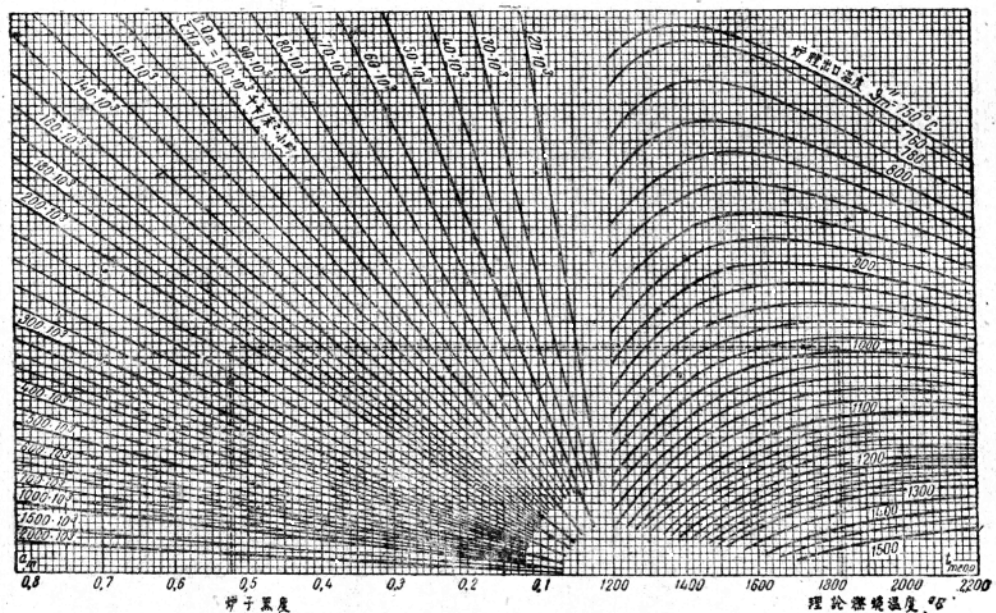


图 12-1 炉内传热计算曲线图

对于燃烧无烟煤的层燃炉(12-9a)式中的 M 值应取为 0.54, 公式(12-10)中的常数 1.27 也相应地改为 1.7, 公式(12-10a)中的常数 0.79 也应改为 0.6。因此, 就不能应用图 12-1 的曲线。

在四角布置喷燃器的煤粉炉内, 如喷燃器的倾斜角改变, 就会改变火焰充满炉膛的情况, 因而也会影响炉内传热和炉膛出口烟气温度 δ_m'' 。在计算中, 当喷燃器向下倾(以水平面为准) 30° 时, 取 $M=0.5$, 当喷燃器向上倾 30° 时, 则取 $M=0.4$ 。

在公式(12-10a)中, φ 和 B_p 已在锅炉热平衡计算中确定; 平均热容 $V C_{cp}$ 可以由公式(12-4)求出; 理论燃烧温度 T_a 可根据炉内有效发热量 Q_m 和炉子出口处过剩空气系数 α_m , 由烟气的 $I-\delta$ 图来确定。因此, 为计算炉子出口烟气温度 δ_m'' , 须预先确定 ζ 、 H_A 和

a_m 等数值。当给定了炉子出口温度时,为了计算炉膛内所需装置的受热面 H_d ,则须先确定 ζ 和 a_m 等数值。

辐射受热面的污染系数 ζ ,如前所述,是表示受热面反向辐射的系数,如果受热面的表面不结渣也不积灰,而是十分干净,则受热面表面的温度 T_{cm} ,与受热面内流动工质的温度相差不多。在这种情况下, T_{cm}^4 与高温火焰的平均有效温度 T_{ϕ} 的四次方的比值几乎可以忽略不计,即污染系数趋近于 1,

$$\zeta = 1 - \frac{T_{cm}^4}{T_{\phi}^4} \approx 1.$$

也就是说,由于这种受热面的表面温度很低,从辐射受热面本身向火焰的反向辐射,与高温火焰向辐射受热面的投射辐射相比,小到可以忽略不计。这种受热面称为“冷的”受热面,它的污染系数 $\zeta=1$ 。

实际上烟气流中多少总带有灰分颗粒,灰分沉积在受热面上,使受热面表面(灰层表面)温度升高,于是受热面表面反向辐射的作用增大。在这种情况下,污染系数显然比 1 小。

如受热面上结有一层灰渣,或受热面表面敷有一层耐火材料(如液态排渣炉或燃用无烟煤末的炉膛下部),则灰渣层表面或耐火材料表面的温度远超过受热面内流动工质的温度,而与火焰温度相差不多。在这种情况下,受热面表面的反向辐射几乎可以和火焰的投射辐射相比拟, T_{cm}^4/T_{ϕ}^4 显然是一个很大的数值(当然不可能大于 1),因此受热面的污染系数 ζ 就很小。

根据上述理由,就很容易理解苏联锅炉汽轮机研究所(ЦКТИ)和全苏热工研究所(ВТИ)计算标准中所推荐的受热面污染系数的数值(表12-1)。

表 12-1 炉子辐射受热器的污染系数

水冷壁型式和燃料种类		污染系数 ζ
光管水冷壁	气体燃料	1.0
	液体燃料和燃用固体燃料的层燃炉	0.9
	固体燃料煤粉炉	0.7
有栓钉并涂有硅矿砂涂料的水冷壁		0.2
用耐火材料复盖的水冷壁		0.1

最近,苏联锅炉汽轮机研究所在煤粉炉上所做的试验指出,联合计算标准中所推荐的 $\zeta=0.7$ (对于固体燃料煤粉炉)显得过高^①,但是到目前为止,一般仍采用表12-1所推荐数值。

至于(12-10)和(12-10a)两式中炉子黑度 a_m 和辐射受热面 H_d 的确定则比较复杂,将于以下两节中分别说明。

① 参看苏联杂志“动力机械制造”1957年第2和第7期。

第二节 炉子黑度

在计算炉子黑度时,首先要分清三个概念:炉内介质的黑度 a 、火焰有效黑度 a_e 和炉子黑度 a_m 。在炉子传热计算公式中所用的是炉子黑度 a_m 。

燃料在炉内燃烧时,炉内充满各种各样的气体;不同气体的辐射能力是不同的,二、原子气体,如氮 N_2 、氧 O_2 、氢 H_2 、一氧化碳 CO 等的辐射能力很弱,几乎可以忽略不

计。辐射能力强的是三原子气体(二氧化碳 CO_2 和二氧化硫 SO_2)、水蒸汽 H_2O 和高分子碳氢化合物(甲烷 CH_4 等)。烟气中高分子碳氢化合物的含量极微,因此通常只考虑 CO_2 、 SO_2 和 H_2O 的辐射。

物体的辐射能力,往往用它的黑度来表示;所谓某一物体的黑度,是指它辐射的全部能量与在相同条件下(波长、温度等相同)绝对黑体辐射的全部能量之比。

从传热学中可以知道,三原子气体总的黑度可用下式计算:

$$a_e = 1 - e^{-k_e P_n S}, \quad (12-11)$$

式中 k_e ——射线被气体的减弱系数或吸收系数;

S ——炉内气体容积辐射层的有效厚度,可由下式算出,

$$S \approx 3.6 \frac{V}{F_{cm}} \text{ 米},$$

而 V ——炉膛有效容积,米³,可以根据图12-2确定;

F_{cm} ——炉膛的总面积,即包围炉膛有效容积的面积,米²;

P_n ——三原子气体和水蒸汽的总压力,即

$$P_n = P_{RO_2} + P_{H_2O},$$

而 $P_{RO_2} = P \tau_{RO_2}$, $P_{H_2O} = P \tau_{H_2O}$ 绝对大气压。

其中 P ——炉内压力,对于非正压燃烧的锅炉, $P = 1$ 绝对大气压,

τ_{RO_2} 和 τ_{H_2O} ——三原子气体 RO_2 和 H_2O 的容积分额,

即

$$\tau_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V};$$

$$\tau_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V}.$$

因此,

$$P_n = P_{RO_2} + P_{H_2O} = P(\tau_{RO_2} + \tau_{H_2O}) = P \tau_n, \quad (12-12)$$

而 $\tau_n = \tau_{RO_2} + \tau_{H_2O}$ ——称为三原子气体(包括水蒸汽)总的容积分额。

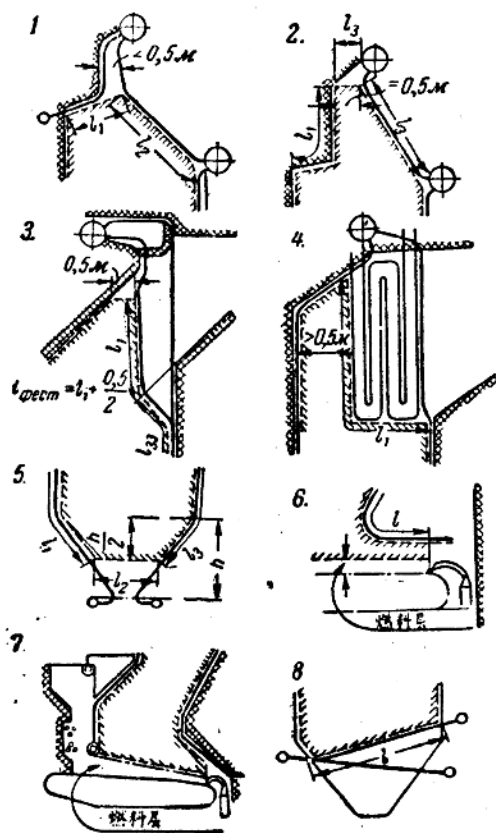


图 11-2 炉膛有效容积,炉墙面积和水冷壁管曝光长度的图示。

把公式(12-12)代入公式(12-11), 可得:

$$a_s = 1 - e^{-k_s r_n} = 1 - e^{-k P S} \quad (12-13)$$

式中 $k = k_s r_n$, 通常也把 k 称为射线被三原子气体(包括水蒸汽)的减弱系数。

烟气中除了三原子气体具有辐射能力外, 悬浮在烟气中的固体颗粒(如灰分和未燃尽的碳粒及炭黑等)也具有吸收和辐射的能力。

所谓炉内介质的黑度 a , 就是指考虑了三原子气体和固体颗粒总辐射的黑度。根据苏联1957年版“锅炉机组热力计算标准方法”, 炉内介质的黑度可用下式计算:

$$a = 1 - e^{-k P S} \quad (12-13a)$$

这时射线减弱系数 k 由两部分组成: 三原子气体对射线的减弱和赤热的固体颗粒对射线的减弱, 并可用下式计算:

$$k = k_s r_n + k_n \mu, \quad (12-14)$$

式中 k_n ——射线被固体颗粒的减弱系数;

μ ——烟气中灰分的浓度。

$$\mu = \frac{10 a_{\mu n} A^p}{V} \text{ 克/标准米}^3. \quad (12-15)$$

在计算射线的减弱系数 k 值前, 首先要了解炉内火焰的性质。根据燃料性质和燃烧方法可将火焰形式分为三种:

(1) 不发光火焰

燃烧气体燃料时^①及用层燃法和火焰——层燃法燃烧无烟煤和贫煤时, 炉膛中的火焰为不发光火焰。在这种情况下, 烟气中的固体颗粒不多, 可以不考虑它对射线的减弱。

(2) 半发光火焰

在煤粉炉燃烧无烟煤及贫煤时, 炉膛中的火焰为半发光火焰。这种火焰形式基本上与不发光火焰相同, 但由于在室燃炉内, 烟气中悬浮的固体颗粒很多, 故须考虑这些颗粒的辐射能力。

(3) 发光火焰

液体燃料及高挥发分的固体燃料燃烧时, 得到的是发光火焰。

对于不发光火焰, 只考虑三原子气体对射线的减弱系数, 并按下式计算:

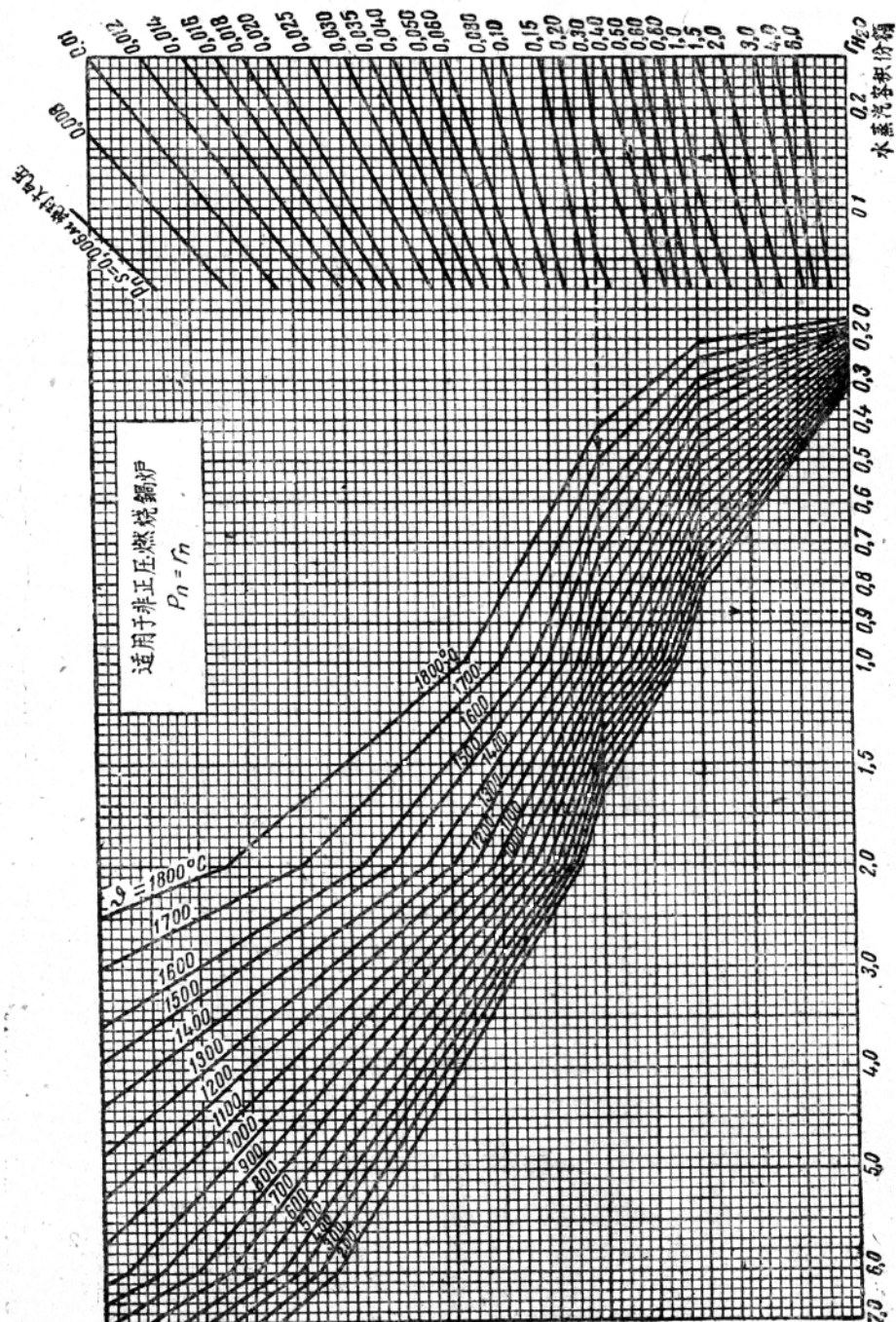
$$k = k_s r_n = \frac{0.8 + 1.6 r_{H_2O}}{\sqrt{P_n S}} \left(1 - 0.38 \frac{T_n''}{1000} \right) r_n. \quad (12-16)$$

对于半发光火焰, 还要考虑赤热灰粒对射线的减弱, 在这种情况下, 三原子气体和赤热灰粒对射线的总的减弱系数可按下式计算:

$$k = k_s r_n + k_n \mu = \frac{0.8 + 1.6 r_{H_2O}}{\sqrt{P_n S}} \left(1 - 0.38 \frac{T_n''}{1000} \right) r_n + 7.0 \mu \sqrt{\frac{1}{d_n^2 T_n''}}, \quad (12-17)$$

式中 d_n ——灰粒的平均有效直径, 微米, 主要决定于磨煤机型式, 对于筒形球磨, 取 $d_n = 13$ 微米, 中速磨和快速磨, 取 $d_n = 16$, 豎井磨在磨页岩和煤时, 取 $d_n = 20$, 豎井

① 燃烧气体燃料时, 关于火焰的发光与否的算法还未完全统一。一般的说, 在蒸汽锅炉炉子中燃烧气体燃料时, 通常得到不发光火焰, 只有在燃烧碳氢化合物很多的煤气时, 才能得到发光火焰。另一种说法是: 气体燃烧的火焰发光性, 与气体燃料性质及喷嘴结构有关。



磨在磨罐采泥煤时, 取 $d_n = 33^\circ$ 。

在公式 (12-17) 中, 前一項是考虑三原子气体对于射綫的减弱系数, 后一項为考虑灰分顆粒对于射綫的减弱系数。公式 (12-16) 和 (12-17) 中的 k , 和 k_n 也可分别从图 12-3 和 12-4 中直接查出。

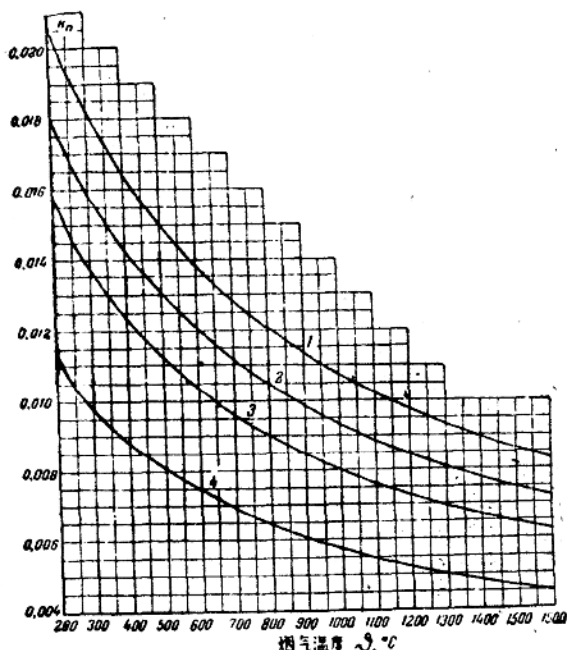


图 12-4 决定气体中固体顆粒的辐射减弱系数 k_n 的曲线

对于发光火焰, k 值等于煤烟顆粒(碳黑)的辐射减弱系数,

$$k = 1.6 \frac{T_m^*}{1000} - 0.5. \quad (12-18)$$

对于具有发光焰的炉子, 若气体辐射层厚度 $S > 2.5$ 米, 則 kPS 之值已足够大, 而使 (12-13a) 式中的 e^{-kPS} 数值很小, 这时就可取 $a = 1$ 。

必須注意, 炉膛中火焰在不同区域具有不同的气体成分和不同的固体顆粒濃度。在噴燃器附近的燃燒中心区域内, 固体顆粒濃度最大。当火焰沿炉膛上升时, 固体顆粒濃度下降(由于顆粒的燃燒和大灰粒的落下)而三原子气体濃度提高, 这就使得火焰中射綫的减弱系数沿火焰高度发生变化, 因而在炉膛內不同的区域, 介质的黑度可能大不相同。同时, 也会使得火焰的温度場沿炉子的高度发生变化。所以当考虑炉內烟气流的辐射时, 就不能只考虑某一地区的介质黑度 a , 而应考虑整个炉膛火焰的有效黑度 a_o 。

火焰的有效黑度 a_o , 按下式計算:

$$a_o = \beta a, \quad (12-19)$$

式中 β ——考虑火焰在炉膛內的充滿程度和温度場特性的修正系数。

① 对于挥发物多的燃料, 室燃时所得的不是半发光火焰, 故这里所給出 d_n 的数值并无用处, 但以后計算对流区烟气的减弱系数时, 是要用到的。

对于不发光火焰, 烟气流中固体颗粒很少, 因此温度场比较均匀。对于燃用固体燃料的煤粉炉, 烟气流中固体颗粒的浓度大而且浓度变化大, 因此温度场显得最不均匀。

对于不同形式的火焰, β 的数值列于表12-2中。

表 12-2 炉内火焰有效黑度修正系数 β 的数值

火 焰 形 式	修 正 系 数 β
不发光火焰	1.00
液体燃料的发光火焰	0.75
固体燃料的发光和半发光火焰	0.65

最后应该说明: 炉子的黑度 a_m 非但决定于炉内高温介质的一次辐射, 而且还与炉内各种表面的二次辐射有关。高介质投射于水冷壁管的辐射能只有一部分被吸收, 而另一部分则被反射出来; 投射于炉墙表面的辐射能则几乎全部被反射出来。因此, 辐射受热面的吸收能力

及其污染的程度和水冷壁管的疏密程度也必然影响炉子的黑度。炉子的黑度 a_m 可按下式计算:

对于煤粉炉, 在 $\psi > 0.25$ 的条件下,

$$a_m = \frac{0.82a_p}{a_p + (1-a_p)\psi\zeta} \quad (12-20)$$

式中 0.82——辐射受热面吸收能力 a_{cm} 的常用值;

ψ ——炉子的水冷壁敷设度, 等于辐射受热面 H_s 与炉墙总面积 F_{cm} 之比, 即

$$\psi = \frac{H_s}{F_{cm}}; \quad (12-21)$$

ζ ——辐射受热面的污染系数(见表12-1)。

如炉子中有部分水冷壁被耐火材料所复盖, 因光管水冷壁和敷有耐火材料的水冷壁的污染系数不同, 此时公式(12-20)中的污染系数须用平均污染系数 ζ_{cp} 代替,

$$\zeta_{cp} = \frac{\zeta_1 H_1 + \zeta_2 H_2}{H_1 + H_2}, \quad (12-22)$$

式中 H_1 和 H_2 ——分别表示光管水冷壁和有耐火涂料的水冷壁的辐射受热面面积;

ζ_1 和 ζ_2 ——分别为两种受热面的污染系数。

图12-5是根据(12-20)式绘制的计算曲线图。

对于层燃炉和火焰-层燃炉, 若水冷壁均匀分布在炉墙上, 炉子黑度用下式计算:

$$a_m = \frac{0.82(a_p + (1-a_p)P\psi')}{1 - (1-\psi'\zeta)(1-\rho\psi')(1-a_p)} \quad (12-23)$$

式中 ψ' ——层燃炉的水冷壁敷设程度,

$$\psi' = \frac{H_s}{F_{cm} - R}; \quad (12-24)$$

式中 R ——炉排上燃料层燃烧面的面积, 米²;

ρ ——燃烧面与辐射受热面之比:

$$\rho = \frac{R}{H_s}.$$

综上所述, 在计算炉子的黑度时, 首先须求出炉内介质的黑度 a , 然后根据介质在

① 该式的推导可参阅苏联杂志“热能动力学”1955年第11期。

炉膛空间充满的程度和温度场特性加以修正，就得到炉内火焰的有效黑度 a_p ，最后再由(12-20)和(12-23)等式求得炉子的黑度 a_m 。

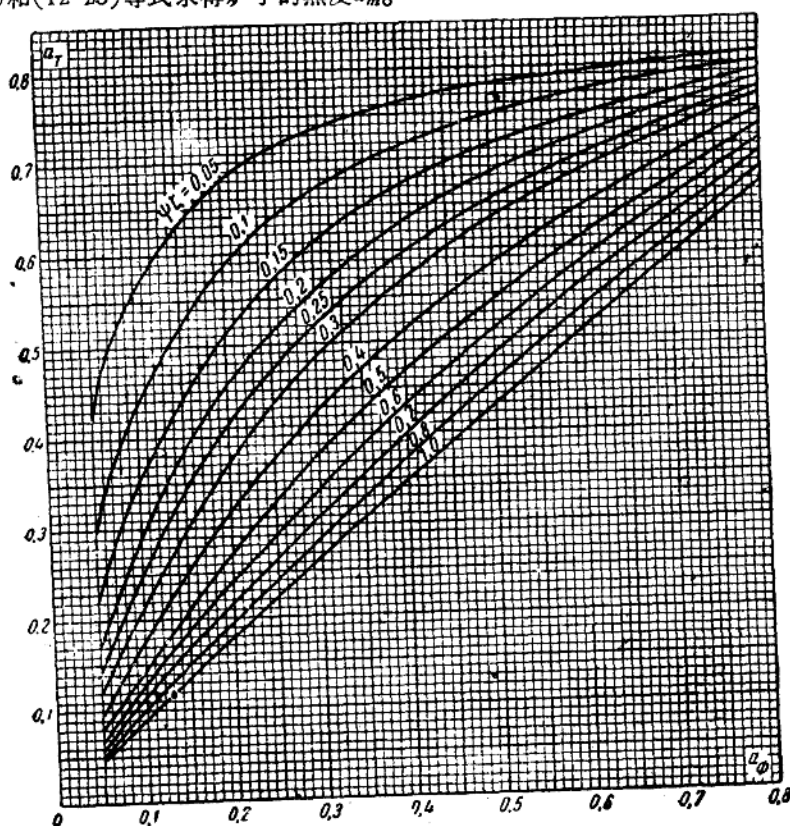


图 12-5 炉子黑度 a_m 的计算曲线图

第三节 辐射受热面

锅炉的炉膛辐射受热面是由许多管子组成。管子中心线之间的距离称为节距 S ，一般为管子外径 d 的1.1至2倍，亦即 $S/d=1.1\sim 2.0$ 。 S/d 称为相对节距。

应该说明：辐射受热面并不是指炉膛周围的表面积 F_{cm} ，也不是指管子的全部外表面积 $n\pi dl$ （ n 为管子根数， l 为管子受热段长度）。

所谓某一水冷壁辐射受热面 H_A ，米²，是指一个假定的连续平面的面积，它在与水冷壁管相同温度和黑度的条件下，其吸热量也与水冷壁管相同。

炉膛辐射受热面 H_A 与布置水冷壁的炉墙面积之间的关系，可以用下式表示：

$$H_A = F_{nA_1}x_1 + F_{nA_2}x_2 + \dots = \sum F_{nA}x \quad (12-25)$$

式中 F_{nA} ——装有水冷壁的(炉墙)面积；

x ——水冷壁的角度系数。

从辐射受热面的定义和(12-25)式可看出：角系数表示投于 F_{nA} 上的辐射能落在管子上的份额。如 $x=1$ 则表示水冷壁与它所布置的平面所能吸收的热量将相等，只要该平面具有与水冷壁表面相同的温度和吸收能力。

水冷壁的角度系数 α 的大小,除了与水冷壁管的相对节距 S/d 有关外,并与自管子中心至炉墙表面的相对距离 e/d (图12-6)有关^①,其值可根据水冷壁的结构特性自图12-6的曲线查出。

对于带有栓钉管子水冷壁和外复铸铁块的水冷壁, $\alpha=1$ 。

对于双面水冷壁,在确定其角系数时,显然不应考虑炉墙的辐射,而其辐射受热面和布置水冷壁的面积 F_{nA} 均应双倍计算。

炉子出口烟窗面积 F_c 的角系数应等于1,因为炉膛向该处放出的辐射热,将为第一、第二和以后几排的管子陆续吸收,而透过它们的辐射热,将为它们后面的受热面所吸收。

从图12-6看出,当 $S/d=1$ 时, $\alpha=1$;随着管子节距的增加,水冷壁角系数减小,当 $S/d=2$ 时,角系数降低至0.875。就是说,与管子彼此紧接布置($S/d=1$)相比,水冷壁管子数目减少一倍(因而水冷壁金属消耗也减少一倍),而辐射受热面仅减少12.5%。

但是为了避免炉墙结渣,水冷壁的布置不宜过疏,一般采用 $S/d=1.08\sim 1.25$ 。只有对于小型或有些中型锅炉, S/d 才增加至1.5。对于用附管式炉墙的锅炉,由于炉墙是支吊在管子上的,所以水冷壁管布置得比较密(管间距离约4~6毫米)。

从避免炉墙结渣的观点来看,在喷燃器的布置不完全对称的条件下,各炉墙水冷壁管子的相对节距可以不同,但是为了制造和安装的方便,一般各炉墙水冷壁仍采用相同的管子节距。对于中小型锅炉,特别是层燃炉,各炉墙的水冷壁,采用不同的节距则比较普遍。

管子节距不同的水冷壁有不同的角系数 α ,对于整个锅炉而言,辐射受热面 H_A 与全部炉墙

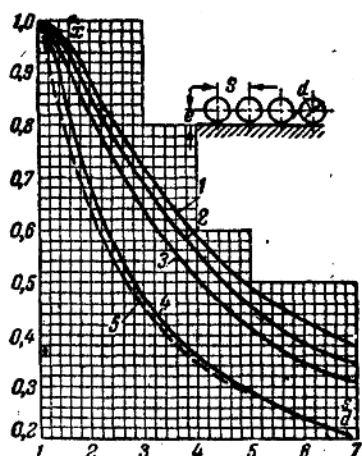


图 12-6 单排光滑管水冷壁的角度系数

- 1—考虑炉墙辐射, $e \geq 1.4d$;
- 2—考虑炉墙辐射, $e = 0.8d$;
- 3—考虑炉墙辐射, $e = 0.5d$;
- 4—考虑炉墙辐射, $e = 0$;
- 5—不考虑炉墙辐射, $e \geq 0.5d$ 。

面积 F_{cm} 之比,

$$\psi = \frac{H_A}{F_{cm}}$$

称为炉子水冷程度或水冷壁敷设度。

若炉子各炉墙的水冷壁的节距均相同,则炉子的水冷程度 ψ 与水冷壁管的角系数 α 近乎相等。

最后应该说明:由于炉膛内各区介质成分和温度的不同,各区辐射受热面单位面积的吸热量也是不等的。

在某些情况下,并不要考虑这个吸热不均的问题,例如当炉膛内全部为蒸发受热面时,则水冷壁所吸的热量,全部用来使水汽化,那就不必考虑各区吸热量的差别。但是在另一些情况下,例如当炉内既有蒸发受热面又有过热器时,则它们所吸的热量必须分

① 辐射受热面角系数计算公式之推导,可参看C.H.休林著1952年版“传热学”。