

锅炉机组热力计算 技术讲座

黄建春

渝石网络 版权所有

<http://www.fishsting.com>

2022年8月

主要内容：

一、锅炉热力计算简介

二、2.1MW热水锅炉热力计算实例

三、锅炉热力计算总结

四、参考资料

五、致谢

一、锅炉热力计算简介

- 热力计算的分类
- 热力计算的步骤
- 热力计算方法
- 热力计算在锅炉设计中的作用

1.1 热力计算的分类

锅炉传热性能计算的目的是确定锅炉各受热面与燃烧产物和工质参数之间的关系。锅炉传热性能计算也称锅炉热力计算。通常按锅炉受热面的传热特点进行锅炉的传热性能计算。

根据已知条件和计算目的的不同，锅炉传热性能计算可分为设计计算和校核计算两类。

设计计算的任务是在给定的给水温度和燃料特性的前提下确定保证达到额定蒸发量、选定的经济指标及给定的蒸汽参数所必需的锅炉各个受热面的结构尺寸，并为选择辅助设备和进行锅炉的其他计算提供原始资料。

校核计算时根据已有的锅炉各受热面结构参数及传热面积和热力系统的型式，在锅炉参数、燃料种类或局部受热面发生变化时，通过传热性能计算确定各个受热面交界处的水温、汽温、烟温及空气温度的值以及各种介质的流量和流速，确定锅炉的热效率和燃料消耗量等。

1.2 热力计算的步骤

锅炉传热性能计算的步骤:

- (1) 列出与计算任务相应的原始数据，当设计计算时应列出锅炉的蒸发量和蒸汽参数、给水参数等，校核计算时应给出炉膛及各受热面的尺寸以及所校核的负荷工况，不论设计计算或校核计算，都应给出燃料的特性数据。
- (2) 燃料的燃烧计算，包括沿烟道各段过量空气条件下三原子气体的容积、水蒸气的容积、容积份额以及烟气和空气的焓值。
- (3) 机组的热平衡计算，确定机组的计算热效率和燃料消耗量。
- (4) 当尾部受热面单级布置时，进行空气预热器的计算；或当尾部受热面双级布置时，依次计算下级空气预热器、第一级省煤器和上级空气预热器，以求得燃烧用热空气温度。
- (5) 炉膛计算
- (6) 上部炉膛各级受热面的计算，包括过热器受热面、再热器受热面或锅炉管束等蒸发受热面。
- (7) 尾部受热面的计算，包括省煤器或上级省煤器的计算
- (8) 整个锅炉机组主要计算数据汇总表。

1.3 热力计算方法

遵循的传热原理：

(1) 热平衡方程

$$Q_{ph} = \varphi(I'' - I' + \Delta\alpha I^0)$$

(2) 传热方程

$$Q_{ch} = KH\Delta t/B_j$$

计算方法：

热力计算一般需要完成每个受热面的局部迭代循环和锅炉整体的迭代循环。

受热面循环是为了达到应有的精度而进行的迭代计算，锅炉整体循环是当假设的排烟温度与实际计算温度相差较大时，在假设排烟温度重新调整后重新进行的计算。

1.4 热力计算在锅炉设计中的作用

锅炉机组热力计算在锅炉设计中的作用：

- (1) 依据热力计算的结果，确定锅炉炉膛的大小，合理地分配辐射受热面和对流受热面的大小，以确保锅炉的效率。
- (2) 依据热力计算的结果，以确保锅炉燃料的变化不致影响锅炉的正常运行。
- (3) 依据热力计算的结果，确保锅炉安全经济地运行。
- (4) 依据热力计算的结果，为设计相同类型不同容量的锅炉提供理论依据。
- (5) 依据热力计算的结果，为锅炉改造提供理论依据。
- (6) 应国家锅检单位的要求，锅炉机组热力计算汇总表必须提供。因此在2007年以后出现了浙江大学热力计算软件、杭州伯勒热力计算软件以及西安交通大学车得福课题组所编的热力计算软件。

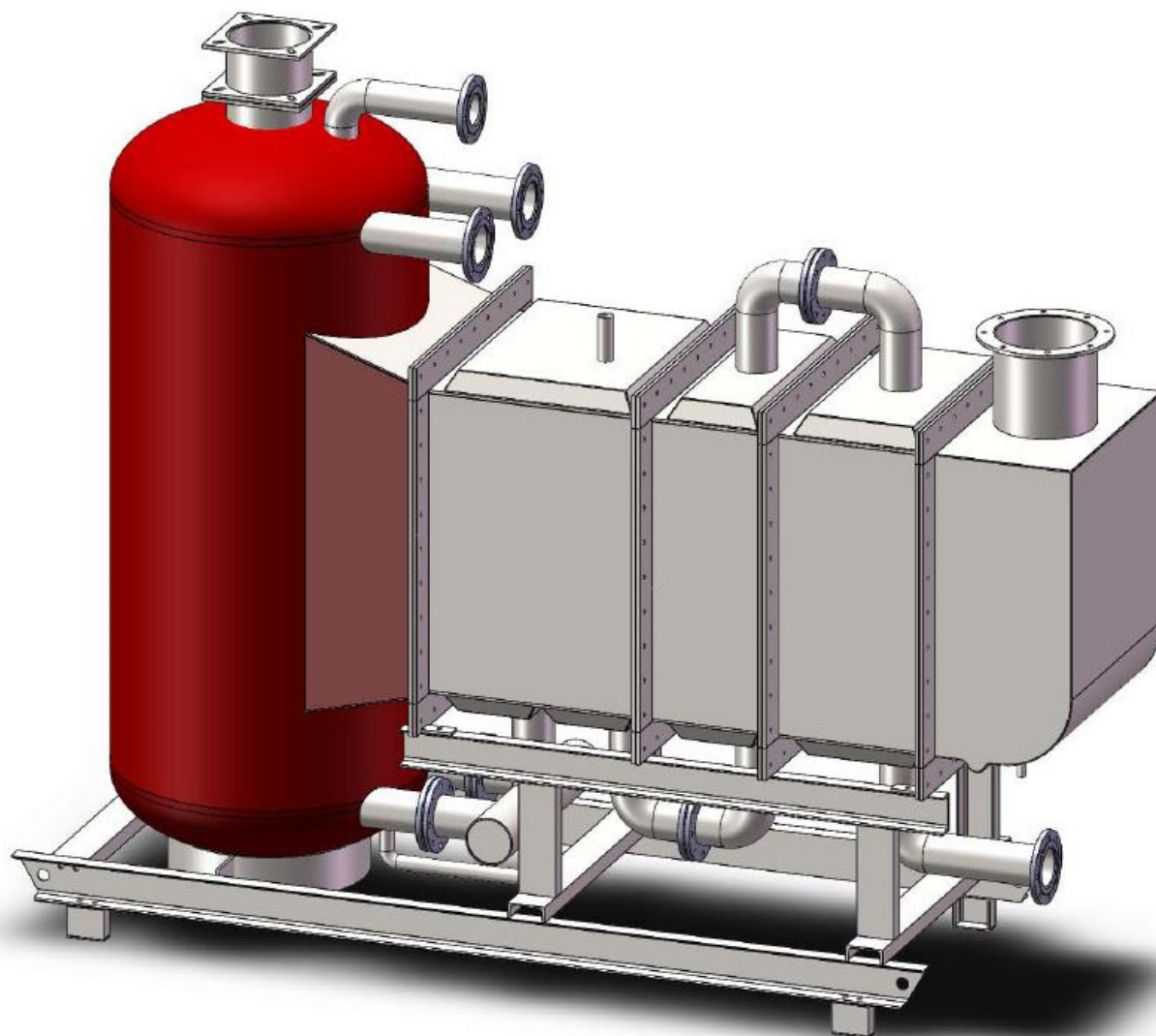
热力计算汇总表

二、2.1MW热水锅炉热力计算实例

- 2.1MW热水锅炉简介
- 燃烧计算
- 热平衡计算
- 炉膛校核计算
- 对流受热面校核计算

2.1 2.1MW热水锅炉简介

一、热水锅炉结构图



2.1 2.1MW热水锅炉简介

二、热水锅炉参数

项目名称	单位	数值
输出功率	MW	2.1
压力	Mpa(g)	0
额定出水/进水温度	°C	80/60
天然气消耗量	Nm ³ /h	210
热效率	%	96

2.1 2.1MW热水锅炉简介

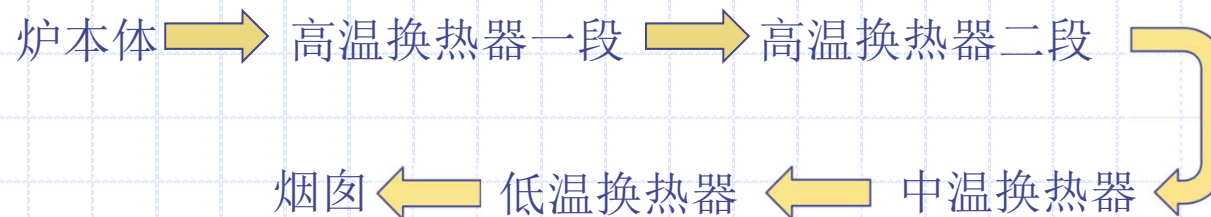
三、天然气参数（其它可燃气性质）

项目名称	符号	单位	数值
甲烷	CH ₄	%	95.26
乙烷	C ₂ H ₆	%	0.9
丙烷	C ₃ H ₈	%	0.14
二氧化碳	CO ₂	%	3
一氧化碳	CO	%	0
氮气	N ₂	%	0.7
硫化氢	H ₂ S	%	0
水分	H ₂ O	%	0
低位发热量	Q _{net}	Kcal/Nm ³	8736.61

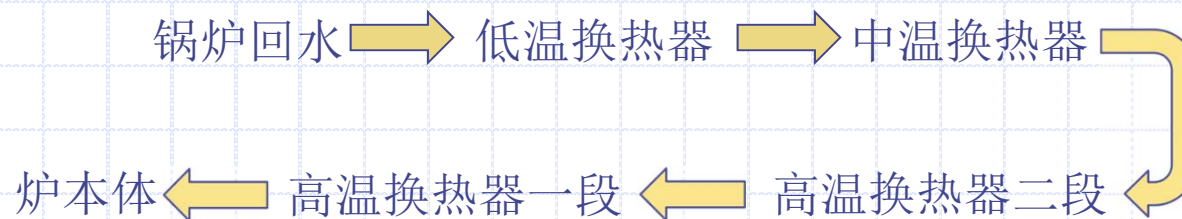
2.1 2.1MW热水锅炉简介

四、烟气流程及水流程

1. 烟气流程



2. 水流程



2.2 燃烧计算

一、燃烧计算的目的

- 理论空气量计算(包括空气量和空气焓值);
- 理论燃烧产物计算(包括烟气容积、烟气焓值、烟气质量和飞灰浓度)。

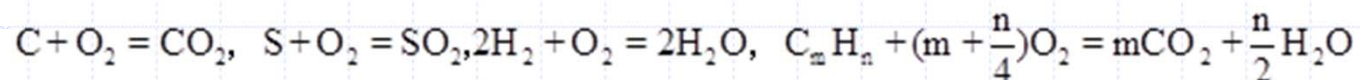
二、燃烧计算的原则

- 空气量及燃烧产物(烟气量)均以标况状态下进行;
- 标况下1mol气体对应体积为22.4L;
- 空气中氧气含量为21%，氮气含量为79%;
- 燃烧过程中氮气不参加燃烧反应;
- 以1kg(或1Nm³)燃料参加燃烧反应为准;
- 以干空气进行计算，但计算烟气量应对空气含水进行修正。

2.2 燃烧计算

三、燃烧计算的基础

几个化学反应方程式



四、过量空气系数的确定

实际空气量与理论空气量的比值称为过量空气系数。一般燃气炉和燃油炉选取1.05。

相关资料

LPG (Liquefied Petroleum Gas) 液化石油气：丙烷(C₃H₈)和丁烷(C₄H₁₀)的混合物，LPG是石油和天然气在适当的压力下形成的混合物并以常温液态的方式存在。

LNG (Liquefied Nature Gas) 液化天然气：主要成分是甲烷(CH₄)，LNG是通常在常压下气态的天然气冷却至-162℃，使之凝结成液体，一般为气态的1/600的体积。

CNG (Compressed Natural Gas) 压缩天然气：主要成分是甲烷(CH₄)，天然气加压并以气态储存在容器中。

2.2 燃烧计算

五、空气量和烟气量的计算

1. 空气和燃烧产物的理论容积和重量

(1) 燃料完全燃烧所需的理论干空气量(V^0):

$$V^0 = 0.0476 \times [0.5\text{CO} + 0.5\text{H}_2 + 1.5\text{H}_2\text{S} + \sum(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2] \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

注：气体燃料中所含少量(3%以下)的成分不明的非饱和烃，可认为是乙烯(C_2H_4)构成。

(2) 氮气的理论容积:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0.79 \times V^0 + 0.01 \times \text{N}_2 \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

(3) 理论水蒸气容积:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0.01 \times (\text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + \sum n/2 \times \text{C}_m\text{H}_n + 0.124d_k) + 0.0161V^0 \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

d_k 为 1m^3 干气体而言的气体燃料的湿度， g/Nm^3 。

(4) 三原子气体容积:

$$V_{\text{RO}_2} = 0.01 \times [\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \sum m(\text{C}_m\text{H}_n)] \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

2.2 燃烧计算

2.当 $\alpha > 1$ 时，燃烧产物的实际容积

(1) 水蒸气容积:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0.0161(\alpha - 1)V^0 \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

(2) 烟气体积:

$$V_y = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha - 1)V^0 \quad \text{Nm}^3/\text{Nm}^3$$

(3) 三原子气体分压力:

$$r_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2} / V_y$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} / V_y$$

(4) 干气体的密度:

$$\rho_g^0 = 0.01[1.96\text{CO}_2 + 1.52\text{H}_2\text{S} + 1.25\text{N}_2 + 1.43\text{O}_2 + 1.25\text{CO} + 0.0899\text{H}_2] \\ + \sum(0.536m + 0.045n)\text{C}_m\text{H}_n] \quad \text{kg}/\text{Nm}^3$$

(5) 烟气重量

$$G_y = \rho_g^0 + d_k/1000 + 1.306\alpha V^0 \quad \text{kg}/\text{Nm}^3$$

2.2 燃烧计算

六、焓温表的编制

焓温表包括三部分：理论烟气焓的计算、理论空气焓的计算、飞灰焓和各受热面处烟气焓的计算。一般都是将其编成函数，直接在软件中直接调用。

2.2 燃烧计算

七、燃料计算结果

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	设计数值
1	理论空气容积	V^0	Nm^3/Nm^3	$0.0476 \times [0.5\text{H}_2 + 0.5\text{CO} + \sum (m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n]$	9.25201
2	理论氮气容积	$V_{\text{N}_2}^0$	Nm^3/Nm^3	$\text{N}_2/100 + 0.79 \times V^0$	7.31609
3	理论水蒸气容积	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0$	Nm^3/Nm^3	$0.01 \times (\text{H}_2 + \sum n/2 \times \text{C}_m\text{H}_n) + 0.0161V^0$	2.08676
4	三原子气体容积	V_{RO_2}	Nm^3/Nm^3	$0.01 \times (\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum m(\text{C}_m\text{H}_n))$	1.0048
5	水蒸气容积	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0.0161 \times (\alpha'' - 1) \times V^0$	2.09421
6	烟气容积	V_y	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{RO}_2} + (\alpha'' - 1) \times V^0$	10.8777
7	水蒸气容积份额	$r_{\text{H}_2\text{O}}$	—	$V_{\text{H}_2\text{O}}/V_y$	0.19252
8	RO ₂ 气体容积份额	r_{RO_2}	—	V_{RO_2}/V_y	0.09237
9	三原子气体容积份额	r_n	—	$r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2}$	0.2849

2.3 热平衡计算

一、热平衡基本概念

定义：锅炉热平衡是指在稳定运行状态下，锅炉输入热量与输出热量及各项热损失之间的热量平衡。

基准：以 0°C 、 0.1MPa 的 1m^3 气体燃料为基准进行计算。

目的：通过热平衡计算，可以得到锅炉的有效利用热量、各项热损失，保热系数(保温系数)计算，从而计算出锅炉热效率和燃料消耗量。

2.3 热平衡计算

二、热平衡方程

$$Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad \text{kcal/m}^3$$

Q_r — 锅炉输入热量

Q_1 — 锅炉有效利用热量

Q_2 — 排烟热损失

Q_3 — 可燃气体不完全燃烧热损失

Q_4 — 固体不完全燃烧热损失

Q_5 — 锅炉散热损失

Q_6 — 其他热损失

用各项热量占输入热量百分比来表示，则：

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100 \%$$

2.3 热平衡计算

三、锅炉效率

(1) 锅炉输入热量 Q_r 是指从锅炉范围外输入锅炉的热量，不包括锅炉范围内循环的热量。

(2) 锅炉有效利用热量 Q_1 是指水和蒸汽经各受热面时吸收的热量。而空气在空气预热器吸热后又回到炉膛，这部分热量属于锅炉内部热量循环，不应计入。

(3) 锅炉效率：锅炉的有效利用热量与锅炉输入热量之比。

$$\text{正平衡: } \eta_{gl} = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\%$$

$$\text{反平衡: } \eta_{gl} = 100 - (q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6)$$

2.3 热平衡计算

四、各项热损失

(1) 固体不完全燃烧热损失 q_4

指燃料中未燃烧或燃尽碳造成的热损失，这些碳残留在灰渣中，也称为机械未完全燃烧热损失。

燃油和燃气炉， $q_4=0$

(2) 可燃气体不完全燃烧热损失 q_3

这是由于 CO 、 H_2 、 CH_4 等可燃气体未燃烧放热就随烟气离开锅炉而造成的热损失，也称化学不完全燃烧热损失。

燃油和燃气炉， $q_3=0.5\%$

2.3 热平衡计算

四、各项热损失

(3) 排烟热损失 q_2

锅炉排烟带走的热量所造成的热损失，等于排烟焓与入炉空气焓之差。

$$q_2 = \frac{(I_{py} - \alpha_{py} I_{lk})(100 - q_4)}{Q_r} \%$$

影响 q_2 的主要因素为排烟温度和烟气容积。

通常 θ_{py} 每升高 12°C 左右，可使 q_2 约增加1%，故要经常吹灰和减少漏风。

(4) 散热损失 q_5

锅炉及管道外表面温度高于环境温度而发生的热损失，一般按照热损失曲线取用。

2.3 热平衡计算

四、各项热损失

(5) 其他损失 q_6

主要指灰渣物理显热损失。燃油炉和燃气炉， $q_6=0\%$

(6) 保热系数 φ

指烟气放热传给工质的热量占烟气放热量的份额。

$$\varphi = 1 - q_5/(\eta_{gl} + q_5)$$

五、燃料的计算

(1) 燃料消耗量 B : $B=Q_1/(\eta_{gl}Q_r)$

(2) 计算燃料消耗量 B_j : $B_j=B(1-q_4/100)$

2.3 热平衡计算

六、计算结果

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	设计数值
1	化学不完全燃烧损失	q_3	%	设计给定	0.5
2	物理不完全燃烧损失	q_4	%	设计给定	0
3	散热损失	q_5	%	设计给定	1
4	环境空气温度	t_{lk}	℃	设计给定	20
5	理论冷空气焓值	I_{lk}^0	Kcal/Nm ³	查烟气空气焓温表	58.3408
6	排烟口过量空气系数	α''	%	设计给定	1.05
7	排烟出口温度	θ''	℃	先假设后校核	95.9199
8	烟气出口焓	I_{py}	Kcal/Nm ³	查烟气空气焓温表	342.1
9	排烟热损失	q_2	%	$(I_{py} - \alpha'' \times I_{lk}^0) \times (100 - q_4) / Q_{dw}$	3.21454
10	排渣热损失	q_6	%	设计给定	0
11	锅炉机组热效率	η_{gl}	%	$100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6$	95.2855
12	保热系数	φ	—	$1 - q_5 / (\eta_{gl} + q_5)$	0.98961
13	平均水压力	P	kgf/cm ²	设计给定	1.05
14	进口水温	t'	℃	设计给定	60
15	进口水焓值	i'	Kcal/kg	查水蒸气表	60.03
16	出口水温	t''	℃	设计给定	80
17	出口水焓值	i''	Kcal/kg	查水蒸气表	80.0379
18	热水供热量	Q	MW	设计给定	2.1
		Q	Kcal/h	单位转换	1800000
19	热水流量	D	t/h	$Q / (i'' - i')$	89.9646
20	锅炉机组有效利用热量	Q_{yx}	Kcal/h	$1000 \times D \times (i'' - i')$	1800000
21	燃料消耗量	B	Nm ³ /h	$100 \times Q_{yx} / (\eta Q_{dw})$	216.224
22	计算燃料消耗量	B_j	Nm ³ /h	$B(100 - q_4) / 100$	216.224

2.4 炉膛校核计算

一、炉膛校核计算的目的

- 计算炉膛出口烟温；
- 校核受热面面积布置是否合理充裕。

二、炉膛校核计算的基础

- 烟气中具有辐射能力的成分有：三原子气体、灰粒(飞灰)、焦炭粒子、炭黑粒子(燃料为油气)；
- 三原子气体是不发光的，即生成的烟气中只含三原子气体是不发光的火焰；
- 气体和重油火焰中基本的辐射成分是三原子气体 CO_2 和 H_2O 及悬浮于其中的细小炭黑粒子。

2.4 炉膛校核计算

三、炉膛校核计算的方法

运用相似“理论分析”的方法，并通过大量实验而综合得出半经验计算公式。

四、炉膛校核计算公式

(1) 热平衡方程式

$$Q_f = \varphi B_j V C_{pj} (T_a - \theta'')$$

(2) 辐射换热方程式

$$Q_f = a_T F_l \sigma_0 (T_{hy}^4 - T_b^4)$$

五、波尔兹曼准则

物理意义：炉膛换热能力与炉膛为黑体时的换热能力之比。

$$Bo = \frac{\varphi B_j V C_{pj}}{\sigma_0 \psi F_l T_a^3}$$

2.4 炉膛校核计算

六、炉膛的出口温度

$$\theta'' = \frac{T_a}{M \left(\frac{a_l}{Bo} \right)^{0.6} + 1} - 273$$

七、炉膛辐射传热热力特性

炉膛容积热负荷 q_v ：单位时间送入炉膛单位容积中的平均热量。

$$q_v = B_j Q_{net} / V_l \quad \text{KW/m}^3$$

炉膛截面热负荷 q_A ：炉膛截面单位面积的热功率。

$$q_A = B_j Q_{net} / A_F \quad \text{KW/m}^2$$

辐射受热面热流密度 q_H ：单位时间内单位受热面所吸收的热量。

$$q_H = B_j Q_f / H \quad \text{KW/m}^2$$

2.4 炉膛校核计算

八、炉膛的几何参数

(1) 角系数 x :

$$x = \frac{\text{投射到受热面上的热量}}{\text{投射到炉壁的热量}}$$

(2) 污染系数 ζ : 表示由于结积灰垢导致管壁温度升高和黑度减小而水冷壁管吸热能力减小的一个系数。

$$\zeta = \frac{\text{受热面吸收的热量}}{\text{投射到受热面的热量}}$$

(3) 热有效系数 ψ : 表示火焰与炉壁间的换热量与火焰有效辐射之比, 等于水冷壁的角度系数与污染系数的乘积。

$$\psi = \frac{\text{受热面吸收的热量}}{\text{投射到炉壁上的热量}}$$

$$\psi = X\zeta$$

2.4 炉膛校核计算

九、炉膛的几何特征

(1) 炉膛的容积 V_L ：取水冷壁管中心线所在平面，水冷壁敷设绝热层的取向火面，出口烟窗取第一排管子中心线所在平面，未设置受热面的取炉壁表面。

(2) 炉壁面积 F_L ：包覆炉膛体积的表面积。

(3) 受热面积 H_L ：贴墙水冷壁及双面曝光水冷壁的辐射受热面可当做一连续平面来求，该平面在吸热上与管子未玷污的水冷壁相当，并按下式计算：

$$H_L = \sum x_i F_i \quad m^2$$

2.4 炉膛校核计算

十、炉膛校核计算步骤

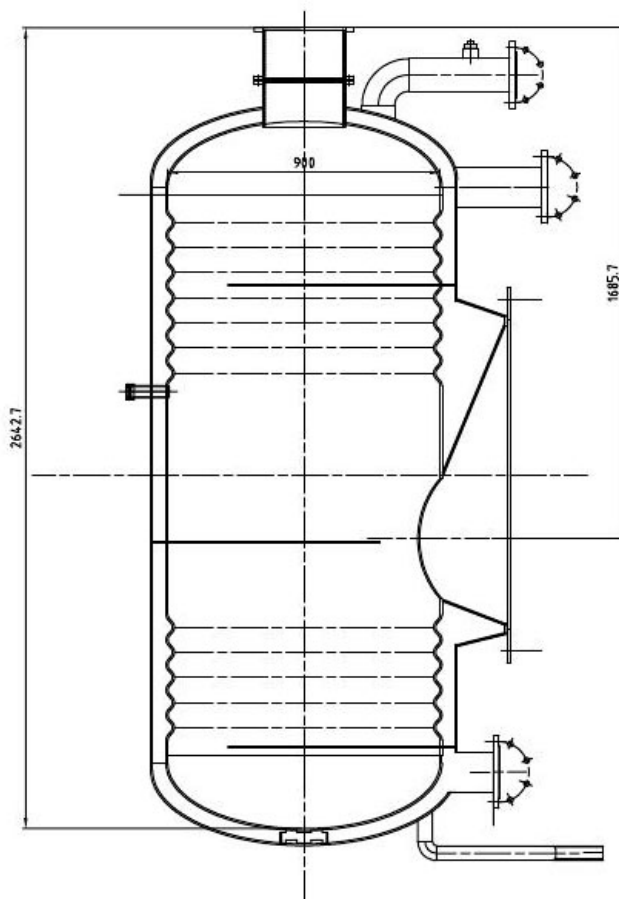
- A、结构计算；
- B、炉膛有效放热量计算；
- C、绝热燃烧温度(理论燃烧温度)计算；
- D、炉膛出口烟温假定；
- E、炉膛平均热容量计算；
- F、烟气中各成分辐射减弱系数计算；
- G、火焰黑度(烟气黑度)计算；
- H、炉膛黑度(炉膛系统黑度)计算；
- I、玻尔兹曼准则数计算；
- J、燃料及燃烧条件影响系数计算M；
- K、炉膛出口烟温计算；
- L、校核出口烟温烟温是否在允许误差范围内 ($|\theta''_j - \theta''| < 50^\circ\text{C}$, 该误差应尽可能小)；
- M、炉膛容积热负荷、炉排面积热负荷计算

2.4 炉膛校核计算

十一、计算结果

(1) 结构计算:

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	数值
一、炉胆结构计算					
1	炉胆内直径	D	m	结构给定	0.9
2	炉胆高度	H	m	结构给定	1.85
3	上封头内表面积	A_1	m^2	按三维模型测量	0.8156
4	下封头内表面积	A_2	m^2	按三维模型测量	0.8678
5	出口窗面积	F_{out}	m^2	按结构计算	0.17584
6	包覆面积	F_L	m^2	包括燃烧器、出口窗面积	6.9637
7	封头容积	V_1	m^3	查封头规格表	0.1113
8	炉膛出口高度	L	m	结构给定	1.686
9	炉膛容积	V_L	m^3	$3.14 \times D^2 / 4 \times H + 2 \times V_1$	1.398923
二、炉胆受热面计算					
10	炉胆角系数	x_1	—	膜式水冷壁 $x=1$; 出口烟窗 $x=1$	1
11	出口烟窗角系数	x_2	—	膜式水冷壁 $x=1$; 出口烟窗 $x=1$	1
12	炉胆的灰污系数	ζ_1	—	按表6-2选取	0.65
13	出口烟窗灰污系数	ζ_2	—	查98标准式6-34	0.5
14	炉胆的热有效系数	ψ	—	$x\zeta$	0.65
15	出口烟窗热有效系数	ψ_{out}	—	$x\zeta$	0.5
16	炉胆的有效辐射面积	H_s	m^2	除去烟窗和燃烧器的面积	6.73566
17	炉膛的有效辐射面积	H_L	m^2	$(H_s \times \psi + F_{out} \times \psi_{out})$	4.466099
18	炉膛平均热有效系数	ψ_{cp}	—	$(H_s \times \psi + F_{out} \times \psi_{out}) / F_L$	0.64134



2.4 炉膛校核计算

十一、计算结果

(2) 热力计算:

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	设计数值
1	燃烧器的火焰直径	d_h	m	$B_j^{0.31} \times [0.147 - 0.02 \times (1 - \text{EXP}(-20 \times (\alpha_{pj} - 1)))]$	0.711343
2	燃烧器火焰长度	L_{hy}	m	$B_j^{0.5} \times [0.182 - 0.02 \times (1 - \text{EXP}(-16 \times (\alpha_{pj} - 1)))]$	2.514252
3	火焰中心位置	M	—	$M = 1.01 - 0.49 \times L_{hy} / L$	0.279286
4	进入炉膛的空气温度	t_{rk}	℃	无空预器	20
5	进炉膛的热风焓值	I_{rk}	Kcal/Nm ³	查烟空气温焓表(理论热空气的焓值)	58.3408
6	环境空气温度	t_{ik}	℃	设计给定	20
7	环境空气焓值	I_{ik}	Kcal/Nm ³	查烟空气温焓表	58.3408
8	进炉膛空气带入的热量	Q_k	Kcal/Nm ³	$(\alpha'' - \Delta\alpha) \times I_{rk} + \Delta\alpha \times I_{ik}$	61.25784
9	燃料的有效放热量	Q_L	Kcal/Nm ³	$Q_{dw} \times (100 - q_3 - q_4 - q_6) / (100 - q_4) + Q_k$	8754.183
10	理论燃烧温度	T_a	℃	查烟空气温焓表	2023.772
11	炉膛出口温度	θ''	℃	先假设后校核	1585.141
12	炉膛出口焓值	I''	Kcal/Nm ³	查烟空气温焓表	6658.404
13	辐射层有效厚度	S	m	$3.6 \times V_L / F_L$	0.723196
14	平均总热容量	$V_{c_{cp}}$	Kcal/Nm ³ ·℃	$(Q_L - I'') / (T_a - \theta'')$	4.777991
15	水蒸气容积	V_{H_2O}	Nm ³ /Nm ³	$V_{H_2O}^0 + 0.0161 \times (\alpha'' - 1) \times V^0$	2.094205
16	烟气容积	V_y	Nm ³ /Nm ³	$V_{H_2O} + V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + (\alpha'' - 1) \times V^0$	10.8777
17	水蒸气容积份额	r_{H_2O}	—	V_{H_2O} / V_y	0.192523
18	RO ₂ 气体容积份额	r_{RO_2}	—	V_{RO_2} / V_y	0.092373
19	三原子气体容积份额	r_n	—	$r_{H_2O} + r_{RO_2}$	0.284895
20	炉膛压力	P	kgf/cm ²	设计给定	1

2.4 炉膛校核计算

十一、计算结果

(2) 热力计算:

21	容积热负荷	Q_v	Kcal/h·m ³	$Q_{dw} \times B_j / V_L$	1.35E+06
22	火焰黑度修正系数	m	—	式(6-07)	0.6
23	三原子气体辐射减弱系数	K_q	1/(m·kgf/cm ²)	$k = k_r r_n = \left(\frac{0.78 + 1.6 r_{H_2O}}{\sqrt{P_n S}} - 0.1 \right) \left(1 - 0.37 \frac{T_r''}{1000} \right) r_n$	0.20446
24	碳氢含量比值	C_p/H_p	—	$0.12 \times \sum (m/n \times C_m H_n)$	2.9001
25	碳黑粒子辐射减弱系数	K_c	1/(m·kgf/cm ²)	$k_c = 0.03 \left(2 - \alpha_i'' \right) \left(1.6 \frac{T_i''}{1000} - 0.5 \right) \frac{C_{ar}}{H_{ar}}$	0.204422
26	发光火焰黑度	α_{fg}	—	$1 - e^{-kps} (k=K_q+K_c)$	0.255991
27	不发光火焰黑度	α_{bfg}	—	$1 - e^{-kps} (k=K_q)$	0.137452
28	火炬黑度(炉内介质)	α_p	—	$m \times \alpha_{fg} + (1-m) \times \alpha_{bfg}$	0.208575
29	火床与炉墙的面积比	ρ	—	$R_L/F_L \quad R_L=0$	0
29	炉膛黑度	α_r	—	$\alpha_r = \frac{\alpha_p + (1-\alpha_p)\rho}{1 - (1-\alpha_p)(1-\psi_{cp})(1-\rho)}$	0.291246
30	波尔兹曼准则	Bo	—	$Bo = \frac{\varphi B_j V c_{cp}}{4.9 \times 10^{-8} \psi_{cp} F_L T_a^3}$	0.385515
31	炉膛出口烟温	θ''	℃	先假设后校核	1585.141
32	炉膛计算出口烟温	θ''_j	℃	$\frac{T_s}{M \left(\frac{\alpha_r}{Bo} \right)^{0.6} + 1} - 273$	1585.145

2.4 炉膛校核计算

十一、计算结果

(2) 热力性能计算:

33	计算误差	ϵ	$^{\circ}\text{C}$	$\theta'' - \theta_j''$ 绝对值 <100	-0.00486
34	计算炉膛出口烟焓	I_j''	Kcal/Nm^3	查烟空气温焓表(温度为计算的温度)	6658.427
35	炉膛辐射受热面吸热量	Q_r	Kcal/Nm^3	$\phi(Q_L - I_j'')$	2073.99
36	辐射受热面热流密度	q_{r1}	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	$B_j Q_r / H_L$	100408.8
37	热水流量	D	kg/h	热平衡计算所得	89964.58
38	热水进口温度	t'	$^{\circ}\text{C}$	设计给定	75.10311
39	热水进口焓值	i'	Kcal/kg	查水蒸气表	75.13249
40	锅炉出口水焓值	i''	Kcal/kg	$i'' + B_j \times Q_r / D$	80.11708
41	热水出口水温	t''	$^{\circ}\text{C}$	查水蒸气表	80.08657
42	炉膛容积热负荷	q_v	$\text{kcal}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$	$B_j Q_{\text{net}} / V_L$	1350339
43		q_v	KW/m^3	单位换算(一般为1150~1800KW/m ³)	1568.494

2.5 对流受热面校核计算

一、对流受热面计算的目的

- 计算受热面传热量，校核吸放热量与传热量误差；
- 受热面结构布置是否合理。

二、计算公式

(1) 热平衡方程

$$Q_{ph} = \varphi(I'' - I' + \Delta\alpha I^0)$$

(2) 传热方程

$$Q_{ch} = KH\Delta t/B_j$$

2.5 对流受热面校核计算

三、对流受热面的传热系数

$$K = \psi \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_h}{\lambda_h} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

α_1 为烟气侧放热系数；

α_2 为工质侧放热系数。

四、受热面积H

吸热介质为蒸汽或水的对流受热面面积取烟气侧的表面积。

五、温压 Δt

指参与换热的两种介质在整个受热面中的平均温差。

$$\Delta t = \frac{\Delta t_b + \Delta t_{sm}}{\ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_{sm}}}$$

Δt_b ——同一端两介质间温差较大值， $^{\circ}\text{C}$

Δt_{sm} ——同一端两介质间温差较小值， $^{\circ}\text{C}$

2.5 对流受热面校核计算

六、烟气流通面积

烟气横向流过光滑管：

$$F_y = ab - z_1 ld$$

烟气横向流过翅片管：

$$F_y = \left[1 - \frac{1}{s_1/d} \left(1 + 2 \frac{h_f}{p} \frac{\delta_p}{d} \right) \right] ab$$

七、工质流通面积

介质在管内流动：

$$f = n\pi d_n^2 / 4$$

2.5 对流受热面校核计算

八、对流传热计算基本步骤

A、结构计算

B、出口烟温假定；

C、放热量计算；

D、温压计算；

E、平均烟温计算；

F、烟气特性计算；

G、烟气平均速度计算；

H、对流放热系数计算；

I、烟气各成分辐射减弱系数计算；

J、烟气黑度计算；

K、烟气辐射放热系数计算；

L、传热系数计算；

M、传热量(受热面吸热量)计算；

N、校核烟气吸、放热量是否在允许误差范围内 $\left(\left| \frac{Q_{ph} - Q_{ch}}{Q_{ph}} \right| < 2\% \right)$

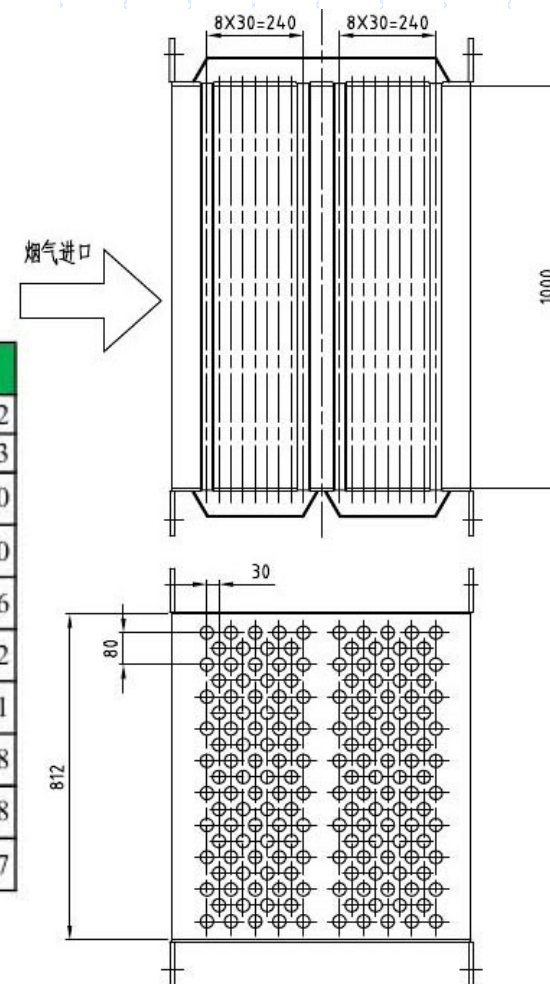
2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

1、高温换热器一段

(1) 结构计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	数值
1	管子规格	d	mm	设计给定	32
		δ	mm	设计给定	3
2	横向节距	S_1	mm	设计给定	80
3	纵向节距	S_2	mm	设计给定	30
4	管子根数	n	根	$Z_1 Z_2$	86
5	烟道宽度	b	m	设计给定	0.812
6	管箱高度	h	m	设计给定	1
7	总受热面积	H	m^2	$\pi d n h$	8.64128
8	烟气流通面积	F_y	m^2	$(b - z_1 d) h$	0.508
9	水流通面积	f	m^2	$n \pi / 4 d_n^2$	0.045637



2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

1、高温换热器一段

(2) 热力性能计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	设计数值
一、烟气侧热平衡计算					
1	入口烟气温度	θ'	℃	由前一部分的出口温度取得	1585.15
2	入口烟气焓值	I'	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	6658.43
3	出口烟气温度	θ''	℃	先假设后校核	891.391
4	出口烟气焓值	I''	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	3502.56
5	平均烟气温度	θ_p	℃	$(\theta'+\theta'')/2$	1238.27
6	环境空气温度	t_{ik}	℃	给定	20
7	环境理论空气焓值	I_{ik}	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	58.3408
8	漏风系数	$\Delta\alpha$	—	给定	0
9	保热系数	φ	—	热平衡计算	0.98961
10	烟气侧放热量	Q_{pb}	Kcal/Nm ³	$\varphi(I'-I''+\Delta\alpha I_{ik})$ I_{ik} 代表漏风温度下的理论空气焓	3123.09
11	吸收炉膛辐射热量	Q_r	Kcal/Nm ³	$y \times q_r \times F_{out}/B_j$	53.9615
二、水侧热平衡计算					
12	热水流量	D	kg/h	热平衡计算	89964.6
13	热水进口温度	t'	℃	中温换热器热力计算	67.5163
14	热水进口焓值	i'	Kcal/kg	查水蒸气表	67.5417
15	热水的有效吸热量	Q_g	Kcal/Nm ³	Q_{pb}	3177.05
16	热水出口焓值	i''	Kcal/kg	$i'+B_j \times Q_g/D$	75.1774
17	热水出口温度	t''	℃	查水蒸气表	75.1496
18	热水的平均温度	t	℃	$(t'+t'')/2$	71.3329

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

1、高温换热器一段

(2) 热力性能计算

三、热水侧放热系数					
19	热水的比容	v	m ³ /kg	查水蒸气表	0.00102
20	热水流通截面	f	m ²	设计给定	0.0456
21	管内径	d _n	mm	d-2δ	26
22	热水流速	w	m/s	Dv/(3600×f)	0.56098
23	水侧放热系数	α ₂	kcal/(m ² ·h·°C)	水温，水压力，管内径，水流速	3199.03
四、烟气侧放热系数					
24	水蒸汽容积	V _{H2O}	Nm ³ /Nm ³	V ⁰ _{H2O} +0.0161×(α'+Δα/2-1)×V ⁰	2.09421
25	烟气体积	V _y	Nm ³ /Nm ³	V _{H2O} +V ⁰ _{N2} +V _{RO2} + (α'+Δα/2-1)×V ⁰	10.8777
26	水蒸汽容积份额	γ _{H2O}	—	V _{H2O} /V _y	0.19252
27	RO ₂ 气体容积份额	γ _{RO2}	—	V _{RO2} /V _y	0.09237
28	三原子气体容积份额	γ _n	—	γ _{H2O} +γ _{RO2}	0.2849
29	烟气流通截面	F _y	m ²	结构计算	0.508
30	平均烟气流速	w	m/s	B _j V _y (1+θ _p /273)/(3600F _y)	7.1194
31	横向错列对流放热系数	α _{hc}	kcal/(m ² ·h·°C)	烟温，排数，横向节距，纵向节距，管径，水蒸汽分压，烟速	88.2645
五、烟气侧辐射放热系数					
32	管径	d	mm	设计给定	32
33	横向节距	S ₁	mm	设计给定	80
34	纵向节距	S ₂	mm	设计给定	30
35	有效辐射层厚度	S	m	0.9d(4/π×s ₁ ×s ₂ /d ² -1)	0.05719
36	平均热水温度	t	°C	蒸汽侧热平衡计算所得	71.3329

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

1、高温换热器一段

(2) 热力性能计算

37	管壁积灰层表面温度	t_b	℃	t+25 对气体燃料而言	96.3329
38	辐射放热系数	α_f	kcal/(m ² ·h·℃)	烟温,水蒸汽分压,分压和,辐射厚度,壁温	11.756
六、计算传热系数					
39	冲刷不均匀系数	ξ	—	横向冲刷	0.85
40	热有效系数	ψ	—	设计给定	0.85
41	烟气侧的放热系数	α_1	kcal/(m ² ·h·℃)	$\xi \times (\alpha_h + \alpha_f)$ 《标准》公式7-12, P50页	85.0175
42	热水侧放热系数	α_2	kcal/(m ² ·h·℃)	热水侧放热系数计算	3199.03
43	传热系数	K	kcal/(m ² ·h·℃)	$\psi[\alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)]$ 《标准》公式7-17, P51页	70.394
七、计算传热量					
44	介质流向判别	P	—	选定(1:一个流程,2:二个流程,3:三个流程)	1
45	入口烟气温	θ'	℃	由前一部分的出口温度取得	1585.15
46	出口烟气温	θ''	℃	先假设后校核	891.391
47	热水进口温度	t'	℃	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	67.5163
48	热水出口温度	t''	℃	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	75.1496
49	温压	ΔT	℃	《标准》公式7-76	1109.83
50	总的受热面积	H	m ²	结构计算	8.64
51	计算传热量	Q_{ch}	kcal/Nm ³	$K \times \Delta T \times H_j / B_j$	3121.87
八、修正误差进行迭代计算					
52	相对误差	e	%	$[(Q_{ph} - Q_{ch}) / Q_{ph}] \times 100 < 2$	0.03917
53	烟气出口温度	θ''	℃	先假设后校核	891.391
54	热量修正值	Q	kcal/kg	$(Q_{ph} + Q_{ch}) / 2$	3122.48
55	修正出口烟气焓值	I''	kcal/kg	$I' - Q / \phi + \Delta \alpha_i k$	3503.18
56	修正出口烟温	θ''	℃	计算迭代参考值	891.542

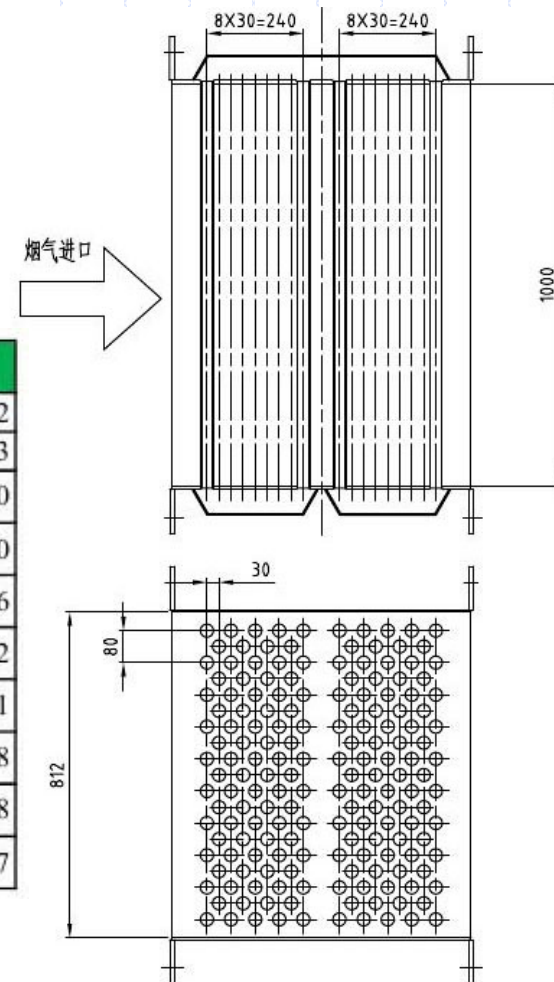
2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

2、高温换热器二段

(1) 结构计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	数值
1	管子规格	d	mm	设计给定	32
		δ	mm	设计给定	3
2	横向节距	S_1	mm	设计给定	80
3	纵向节距	S_2	mm	设计给定	30
4	管子根数	n	根	$Z_1 Z_2$	86
5	烟道宽度	b	m	设计给定	0.812
6	管箱高度	h	m	设计给定	1
7	总受热面积	H	m^2	$\pi d n h$	8.64128
8	烟气流通面积	F_y	m^2	$(b - z_1 d) h$	0.508
9	水流通面积	f	m^2	$n \pi / 4 d_n^2$	0.045637



2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

2、高温换热器二段

(2) 热力性能计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	设计数值
一、烟气侧热平衡计算					
1	入口烟气温度	θ'	℃	由前一部分的出口温度取得	891.542
2	入口烟气焓值	I'	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	3503.22
3	出口烟气温度	θ''	℃	先假设后校核	528.285
4	出口烟气焓值	I''	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	1983.69
5	平均烟气温度	θ_p	℃	$(\theta'+\theta'')/2$	709.913
6	环境空气温度	t_{lk}	℃	给定	20
7	环境理论空气焓值	I_{lk}	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	58.3408
8	漏风系数	$\Delta\alpha$	—	给定	0
9	保热系数	φ	—	热平衡计算	0.98961
10	烟气侧放热量	Q_{ph}	Kcal/Nm ³	$\varphi(I'-I''+\Delta\alpha I_{lk})$ I_{lk} 代表漏风温度下的理论空气焓	1503.75
二、水侧热平衡计算					
12	热水流量	D	kg/h	热平衡计算	89964.6
13	热水进口温度	t'	℃	中温换热器热力计算	63.8949
14	热水进口焓值	i'	Kcal/kg	查水蒸气表	63.9213
15	热水的有效吸热量	Q_g	Kcal/Nm ³	Q_{ph}	1503.75
16	热水出口焓值	i''	Kcal/kg	$i'+B_j \times Q_g/D$	67.5354
17	热水出口温度	t''	℃	查水蒸气表	67.5058
18	热水的平均温度	t	℃	$(t'+t'')/2$	65.7004

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

2、高温换热器二段

(2) 热力性能计算

三、热水侧放热系数					
19	热水的比容	v	m^3/kg	查水蒸气表	0.00102
20	热水流通截面	f	m^2	设计给定	0.0456
21	管内径	d_n	mm	$d-2\delta$	26
22	热水流速	w	m/s	$Dv/(3600 \times f)$	0.55918
23	水侧放热系数	α_2	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	水温, 水压力, 管内径, 水流速	3090.11
四、烟气侧放热系数					
24	水蒸汽容积	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0.0161 \times (\alpha' + \Delta\alpha/2 - 1) \times V^0$	2.09421
25	烟气容积	V_y	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{RO}_2} + (\alpha' + \Delta\alpha/2 - 1) \times V^0$	10.8777
26	水蒸汽容积份额	$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	—	$V_{\text{H}_2\text{O}}/V_y$	0.19252
27	RO ₂ 气体容积份额	γ_{RO_2}	—	V_{RO_2}/V_y	0.09237
28	三原子气体容积份额	γ_n	—	$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} + \gamma_{\text{RO}_2}$	0.2849
29	烟气流通截面	F_y	m^2	结构计算	0.508
30	平均烟气流速	w	m/s	$B_j V_y (1 + \theta_p/273)/(3600 F_y)$	4.63038
31	横向错列对流传热系数	α_{hc}	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	烟温, 排数, 横向节距, 纵向节距, 水蒸汽分压	68.2547
五、烟气侧辐射放热系数					
32	管径	d	mm	设计给定	32
33	横向节距	S_1	mm	设计给定	80
34	纵向节距	S_2	mm	设计给定	30
35	有效辐射层厚度	S	m	$0.9d(4/\pi \times s_1 \times s_2/d^2 - 1)$	0.05719
36	平均热水温度	t	$^\circ\text{C}$	蒸汽侧热平衡计算所得	65.7004
37	管壁积灰层表面温度	t_b	$^\circ\text{C}$	$t+25$ 对气体燃料而言	90.7004

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

2、高温换热器二段

(2) 热力性能计算

38	辐射放热系数	α_r	kcal/(m ² ·h·°C)	烟温, 水蒸汽分压, 分压和, 辐射厚度, 壁温	5.4069
六、计算传热系数					
39	冲刷不均匀系数	ξ	—	横向冲刷	1
40	热有效系数	ψ	—	设计给定	0.85
41	烟气侧的放热系数	α_1	kcal/(m ² ·h·°C)	$\xi \times (\alpha_h + \alpha_r)$ 《标准》公式7-12, P50页	73.6616
42	热水侧放热系数	α_2	kcal/(m ² ·h·°C)	热水侧放热系数计算	3090.11
43	传热系数	K	kcal/(m ² ·h·°C)	$\psi[\alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)]$ 《标准》公式7-17, P51页	61.1545
七、计算传热量					
44	介质流向判别	P	—	选定(1:一个流程, 2:二个流程, 3:三个流程)	1
45	入口烟气温度	θ'	°C	由前一部分的出口温度取得	891.542
46	出口烟气温度	θ''	°C	先假设后校核	528.285
47	热水进口温度	t'	°C	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	63.8949
48	热水出口温度	t''	°C	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	67.5058
49	温压	ΔT	°C	《标准》公式7-76	615.441
50	总的受热面积	H	m ²	结构计算	8.64
51	计算传热量	Q_{ch}	kcal/Nm ³	$K \times \Delta T \times H_j / B_j$	1503.96
八、修正误差进行迭代计算					
52	相对误差	e	%	$[(Q_{ph} - Q_{ch}) / Q_{ph}] \times 100 < 2$	-0.01397
53	烟气出口温度	θ''	°C	先假设后校核	528.285
54	热量修正值	Q	kcal/kg	$(Q_{ph} + Q_{ch}) / 2$	1503.85
55	修正出口烟气焓值	I''	kcal/kg	$I' - Q / \phi + \Delta \alpha_{ik}$	1983.58
56	修正出口烟温	θ''	°C	计算迭代参考值	528.331

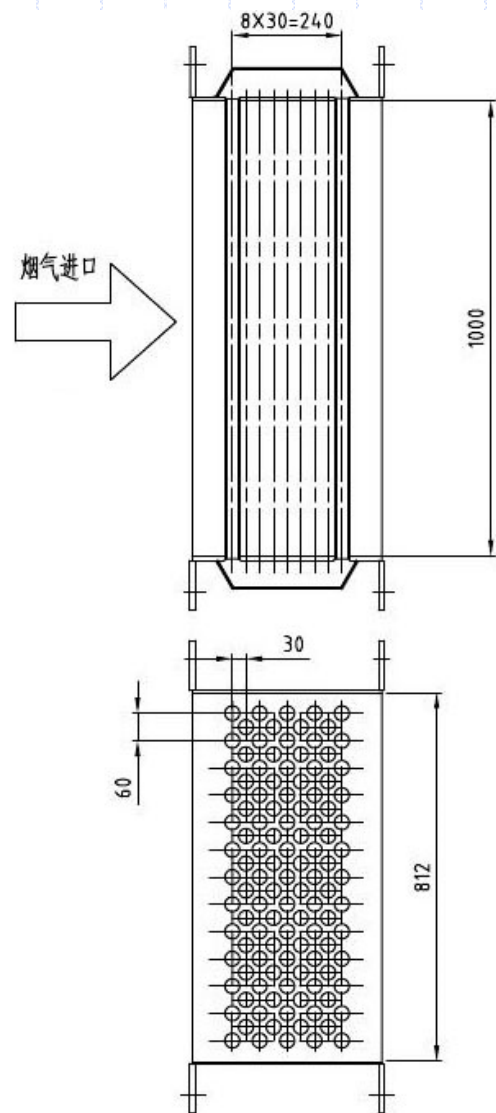
2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

3、中温换热器

(1) 结构计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	数值
1	管子规格	d	mm	设计给定	32
		δ	mm	设计给定	3
2	横向节距	S_1	mm	设计给定	60
3	纵向节距	S_2	mm	设计给定	30
10	管子根数	n	根	$Z_1 Z_2$	113
11	烟道宽度	b	m	设计给定	0.812
12	管箱高度	h	m	设计给定	1
13	总受热面积	H	m^2	$\pi d n h$	11.35424
14	烟气流通面积	F_y	m^2	$(b - z_1 d) h$	0.412
15	水流通面积	f	m^2	$n \pi / 4 d_n^2$	0.059965



2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

3、中温换热器

(2) 热力性能计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	设计数值
一、烟气侧热平衡计算					
1	入口烟气温度	θ'	℃	由前一部分的出口温度取得	528.285
2	入口烟气焓值	I'	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	1983.69
3	出口烟气温度	θ''	℃	先假设后校核	289.158
4	出口烟气焓值	I''	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	1053.4
5	平均烟气温度	θ_p	℃	$(\theta'+\theta'')/2$	408.721
6	环境空气温度	t_{lk}	℃	给定	20
7	环境理论空气焓值	I_{lk}	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	58.3408
8	漏风系数	$\Delta\alpha$	—	给定	0
9	保热系数	φ	—	热平衡计算	0.98961
10	烟气侧放热量	Q_{ph}	Kcal/Nm ³	$\varphi(I'-I''+\Delta\alpha I_{lk})$ I_{lk} 代表漏风温度下的理论空气焓	920.626
二、水侧热平衡计算					
12	热水流量	D	kg/h	热平衡计算	89964.6
13	热水进口温度	t'	℃	低温换热器热力计算	61.6864
14	热水进口焓值	i'	Kcal/kg	查水蒸气表	61.7141
15	热水的有效吸热量	Q_g	Kcal/Nm ³	Q_{ph}	920.626
16	热水出口焓值	i''	Kcal/kg	$i'+B_j \times Q_g/D$	63.9267
17	热水出口温度	t''	℃	查水蒸气表	63.8941
18	热水的平均温度	t	℃	$(t'+t'')/2$	62.7903

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

3、中温换热器

(2) 热力性能计算

三、热水侧放热系数					
19	热水的比容	v	m^3/kg	查水蒸气表	0.00102
20	热水流通截面	f	m^2	设计给定	0.05996
21	管内径	d_n	mm	$d-2\delta$	26
22	热水流速	w	m/s	$Dv/(3600 \times f)$	0.42454
23	水侧放热系数	α_2	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	水温, 水压力, 管内径, 水流速	2439.88
四、烟气侧放热系数					
24	水蒸汽容积	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0.0161 \times (\alpha' + \Delta\alpha/2 - 1) \times V^0$	2.09421
25	烟气容积	V_y	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{RO}_2} + (\alpha' + \Delta\alpha/2 - 1) \times V^0$	10.8777
26	水蒸汽容积份额	$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	—	$V_{\text{H}_2\text{O}}/V_y$	0.19252
27	RO ₂ 气体容积份额	γ_{RO_2}	—	V_{RO_2}/V_y	0.09237
28	三原子气体容积份额	γ_n	—	$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} + \gamma_{\text{RO}_2}$	0.2849
29	烟气流通截面	F_y	m^2	结构计算	0.412
30	平均烟气流速	w	m/s	$B_j V_y (1 + 0_p/273)/(3600 F_y)$	3.95982
31	横向错列对流放热系数	α_{hc}	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	烟温, 排数, 横向节距, 纵向节距, 水蒸汽分压	63.3018
五、烟气侧辐射放热系数					
32	管径	d	mm	设计给定	32
33	横向节距	S_1	mm	设计给定	60
34	纵向节距	S_2	mm	设计给定	30
35	有效辐射层厚度	S	m	$0.9d(4/\pi \times s_1 \times s_2/d^2 - 1)$	0.03569
36	平均热水温度	t	$^\circ\text{C}$	蒸汽侧热平衡计算所得	62.7903
37	管壁积灰层表面温度	t_b	$^\circ\text{C}$	$t+25$ 对气体燃料而言	87.7903
38	辐射放热系数	α_r	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	烟温, 水蒸汽分压, 分压和, 辐射厚度, 壁温	2.08397

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

3、中温换热器

(2) 热力性能计算

六、计算传热系数					
39	冲刷不均匀系数	ξ	—	横向冲刷	1
40	热有效系数	ψ	—	设计给定	0.85
41	烟气侧的放热系数	α_1	kcal/(m ² ·h·°C)	$\xi \times (\alpha_h + \alpha_f)$ 《标准》公式7-12, P50页	65.3858
42	热水侧放热系数	α_2	kcal/(m ² ·h·°C)	热水侧放热系数计算	2439.88
43	传热系数	K	kcal/(m ² ·h·°C)	$\psi[\alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)]$ 《标准》公式7-17, P51页	54.1274
七、计算传热量					
44	介质流向判别	P	—	选定(1:一个流程, 2:二个流程, 3:三个流程)	1
45	入口烟气温度	θ'	°C	由前一部分的出口温度取得	528.285
46	出口烟气温度	θ''	°C	先假设后校核	289.158
47	热水进口温度	t'	°C	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	61.6864
48	热水出口温度	t''	°C	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	63.8941
49	温压	ΔT	°C	《标准》公式7-76	323.836
50	总的受热面积	H	m ²	结构计算	11.354
51	计算传热量	Q_{ch}	kcal/Nm ³	$K \times \Delta T \times H_j / B_j$	920.443
八、修正误差进行迭代计算					
52	相对误差	e	%	$[(Q_{ph} - Q_{ch}) / Q_{ph}] \times 100 < 2$	0.01982
53	烟气出口温度	θ''	°C	先假设后校核	289.158
54	热量修正值	Q	kcal/kg	$(Q_{ph} + Q_{ch}) / 2$	920.535
55	修正出口烟气焓值	I''	kcal/kg	$I' - Q / \varphi + \Delta \alpha i_k$	1053.49
56	修正出口烟温	θ''	°C	计算迭代参考值	289.196

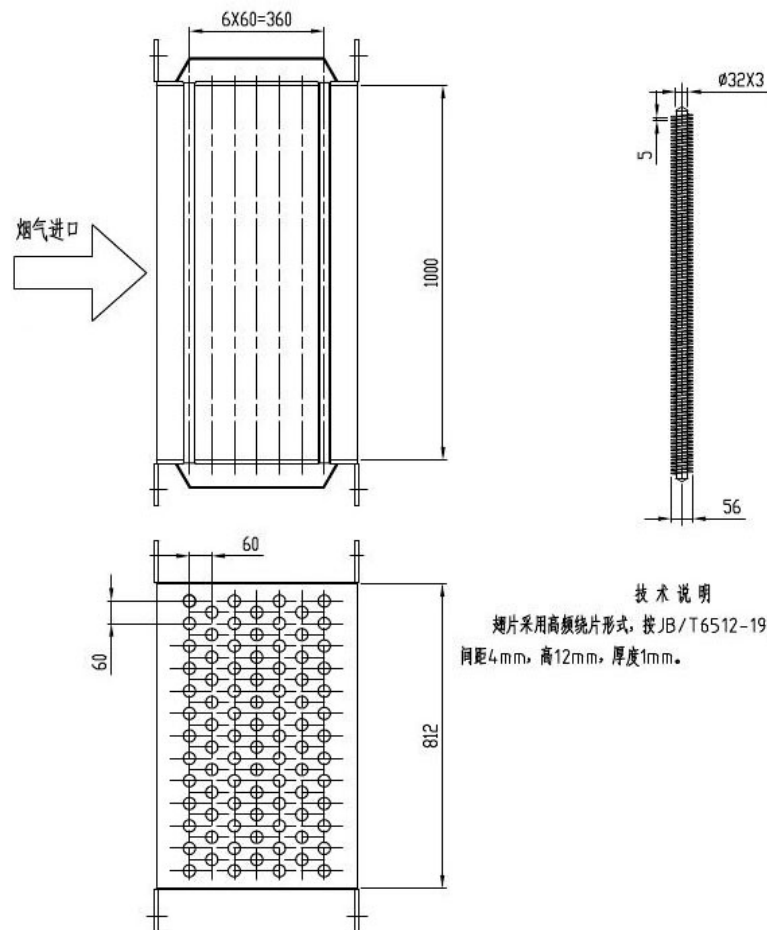
2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

4、低温换热器

(1) 结构计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	数值
1	管子规格	d	mm	设计给定	32
		δ	mm	设计给定	3
2	横向节距	S ₁	mm	设计给定	60
3	纵向节距	S ₂	mm	设计给定	60
4	管子根数	n	根	Z ₁ Z ₂	88
5	烟道宽度	b	m	设计给定	0.812
6	管箱高度	h	m	设计给定	1
7	翅片管高度	h _f	mm	设计给定	12
8	翅片管厚度	δ _p	mm	设计给定	1
9	翅片管间距	S _p	mm	设计给定	4
10	翅片管外径	d _y	m	d+2×h _f	0.056
11	翅片节距	p	m	S _p +δ _p	0.005
12	翅片数量	n _y	片	(h-0.05)/P	190
13	螺旋管翅片表面积	A _{fy}	m ²	$[2 \times \pi / 4 \times (d_y^2 - d^2) + \pi d_y \delta_p] \times n_y$	0.663419
14	螺旋翅片间管表面积	A _{ry}	m ²	$\pi d (h - n_y \delta_p)$	0.081389
15	螺旋管的总表面	A _{hy}	m ²	A _{fy} + A _{ry}	0.744808
16	总受热面积	H	m ²	n × A _{hy}	65.5431
17	烟气流通面积	F _y	m ²	$\left[1 - \frac{1}{s_1/d} \left(1 + 2 \frac{h_f \delta_p}{p d} \right) \right] ab$	0.313973
18	水流通面积	f	m ²	$n\pi/4d_n^2$	0.046698



2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

4、低温换热器

(2) 热力性能计算

序号	项目名称	符号	单位	计算公式及来源	设计数值
一、烟气侧热平衡计算					
1	入口烟气温度	θ'	℃	由前一部分的出口温度取得	289.158
2	入口烟气焓值	I'	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	1053.4
3	出口烟气温度	θ''	℃	先假设后校核	95.8702
4	出口烟气焓值	I''	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	341.921
5	平均烟气温度	θ_p	℃	$(\theta'+\theta'')/2$	192.514
6	环境空气温度	t_{lk}	℃	给定	20
7	环境理论空气焓值	I_{lk}	Kcal/Nm ³	查烟-空气温焓表	58.3408
8	漏风系数	$\Delta\alpha$	—	给定	0
9	保热系数	φ	—	热平衡计算	0.98961
10	烟气侧放热量	Q_{ph}	Kcal/Nm ³	$\varphi(I'-I''+\Delta\alpha I_{lk})$ I_{lk} 代表漏风温度下的理论空气焓	704.09
二、水侧热平衡计算					
11	热水流量	D	kg/h	热平衡计算	89964.6
12	热水进口温度	t'	℃	设计给定	60
13	热水进口焓值	i'	Kcal/kg	查水蒸气表	60.029
14	热水的有效吸热量	Q_g	Kcal/Nm ³	Q_{ph}	704.09
15	热水出口焓值	i''	Kcal/kg	$i'+B_j \times Q_g/D$	61.7212
16	热水出口温度	t''	℃	查水蒸气表	61.6864
17	热水的平均温度	t	℃	$(t'+t'')/2$	60.8432

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

4、低温换热器

(2) 热力性能计算

三、热水侧放热系数					
18	热水的比容	v	m^3/kg	查水蒸气表	0.00102
19	热水流通截面	f	m^2	设计给定	0.0467
20	管内径	d_n	mm	$d-2\delta$	26
21	热水流速	w	m/s	$Dv/(3600 \times f)$	0.54455
22	水侧放热系数	α_2	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	水温, 水压力, 管内径, 水流速	2946.88
四、烟气侧放热系数					
23	水蒸汽容积	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0.0161 \times (a' + \Delta a/2 - 1) \times V^0$	2.15006
24	烟气体积	V_y	Nm^3/Nm^3	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{RO}_2}^0 + (a' + \Delta a/2 - 1) \times V^0$	14.4031
25	翅片节距	p	mm	设计给定	5
26	翅片管高度	h_f	mm	设计给定	12
27	沿烟气方向排数	n	排	设计给定	7
28	烟气流通截面	F_y	m^2	结构计算	0.31397
29	平均烟气流速	w	m/s	$B_j V_y (1 + \theta_p/273) / (3600 F_y)$	4.69811
30	横向错列对流放热系数	α_z	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	按73标准公式(7-70) 错排	35.4901
31	平均热水温度	t	$^\circ\text{C}$	蒸汽侧热平衡计算所得	60.8432
32	管壁积灰层表面温度	t_b	$^\circ\text{C}$	$t+25$ 对气体燃料而言	85.8432
33	肋片金属导热系数	λ_z	$\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	查金属的导热系数表	49.2959
34	形状参数	βh_f	—	$\beta = \sqrt{\frac{2\psi_{p6}\alpha_z}{\delta\lambda_z(1+\varepsilon\psi_{p6}\alpha_z)}}$ $\varepsilon=0 \psi_{p6}=0.85$	0.41981
35	形状参数	D/d	—	$(d+2h_f)/d$	1.75

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

4、低温换热器

(2) 热力性能计算

36	肋片的有效系数	E	—	查线算图24	0.93
37	烟气侧折算放热系数	α_{1np}	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	$(H_{p6} \cdot E \cdot /H + H_m/H) \psi_{p6} \cdot \alpha_z / (1 + \varepsilon \cdot \psi_{p6} \cdot \alpha_z)$	28.2857
五、计算传热系数					
38	冲刷不均匀系数	ξ	—	横向冲刷	1
39	热有效系数	ψ	—	设计给定	0.85
40	烟气侧的放热系数	α_1	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	$\xi \times (\alpha_h + \alpha_f)$ 《标准》公式7-12, P50页	28.2857
41	热水侧放热系数	α_2	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	热水侧放热系数计算	2946.88
42	传热系数	K	$\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	$\psi[\alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)]$ 《标准》公式7-17, P51页	24.0428
六、计算传热量					
43	介质流向判别	P	—	选定(1:一个流程, 2:二个流程, 3:三个流程)	1
44	入口烟气温度	θ'	$^\circ\text{C}$	由前一部分的出口温度取得	289.158
45	出口烟气温度	θ''	$^\circ\text{C}$	先假设后校核	95.8702
46	热水进口温度	t'	$^\circ\text{C}$	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	60
47	热水出口温度	t''	$^\circ\text{C}$	由工质流程(设定或由出口焓值计算)	61.6864
48	温压	ΔT	$^\circ\text{C}$	《标准》公式7-76	96.5933
49	总的受热面积	H	m^2	结构计算	65.5431
50	计算传热量	Q_{ch}	kcal/Nm^3	$K \times \Delta T \times H_f / B_j$	703.988
七、修正误差进行迭代计算					
51	相对误差	e	%	$[(Q_{ph} - Q_{ch}) / Q_{ph}] \times 100 < 2$	0.0144
52	烟气出口温度	θ''	$^\circ\text{C}$	先假设后校核	95.8702
53	热量修正值	Q	kcal/kg	$(Q_{ph} + Q_{ch}) / 2$	704.059
54	修正出口烟气焓值	I''	kcal/kg	$I' - Q / \varphi + \Delta \alpha i_k$	341.951
55	修正出口烟温	θ''	$^\circ\text{C}$	计算迭代参考值	95.8983

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

5、机组热力计算汇总表

锅炉规范							
项目名称	符号	单位	数值	项目名称	符号	单位	数值
热水供热量	Q	MW	2.1	平均水压力	P	kgf/cm ²	1.05
进口水温	t'	℃	60	环境空气温度	t _{ik}	℃	20
出口水温	t''	℃	80.086571				
燃料计算				热平衡计算			
项目名称	符号	单位	数值	项目名称	符号	单位	数值
元素成份	CH ₄	%	95.26	排烟温度	θ''	℃	95.8702
元素成份	C ₂ H ₆	%	0.9	排烟焓	I _{py}	kcal/Kg	341.921
元素成份	C ₃ H ₈	%	0.14	排烟热损失	q ₂	%	3.21249
元素成份	CO ₂	%	3	化学热损失	q ₃	%	0.5
元素成份	N ₂	%	0.7	机械热损失	q ₄	%	0
低位发热量	Q _{dw}	Kcal/Nm ³	8736.608	散热损失	q ₅	%	1
理论空气容积	V ⁰	Nm ³ /Nm ³	9.252012	保热系数	φ	—	0.98961
理论氮气容积	V ⁰ _{N₂}	Nm ³ /Nm ³	7.3160895	锅炉热效率	η _{gl}	%	95.2875
理论水蒸气容积	V ⁰ _{H₂O}	Nm ³ /Nm ³	2.0867574	计算燃料消耗量	B _j	Nm ³ /h	216.219
RO ₂ 气体容积	V _{RO₂}	Nm ³ /Nm ³	1.0048				
炉膛计算相关数据汇总							
项目名称	符号	单位	数值	项目名称	符号	单位	数值
炉膛容积	V _L	m ³	1.3989225	总辐射面面积	H _L	m ²	4.4661
火焰中心位置系数	M	—	0.2792861	理论燃烧温度	T _a	℃	2023.77
出口烟温	θ''	℃	1585.1455	出口烟焓	I''	kcal/Kg	6658.4
容积热负荷	q _v	kcal/(m ³ .h)	1350339.2	辐射热负荷	q _{ll}	kcal/(m ² .h)	100409
辐射传热量	Q _r	kcal/Kg	2073.9899	出口空气过量系数	α''	—	1.05
热水入口水温	t'	℃	75.132494	热水出口温度	t''	℃	80.0866

2.5 对流受热面校核计算

九、计算结果

5、机组热力计算汇总表

传热部件计算结果汇总						
项目名称	符号	单位	高温一段	高温二段	中温换热器	低温换热器
管子外径	d	mm	32	32	32	32
管子壁厚	δ	mm	3	3	3	3
横向节距	S_1	mm	80	80	60	60
纵向节距	S_2	mm	30	30	30	60
翅片管高度	h_f	mm	—	—	—	12
翅片管厚度	δ_p	mm	—	—	—	1
翅片管间距	S_p	mm	—	—	—	4
受热面积	H_j	m^2	8.64	8.64	11.354	65.543104
入口过量空气系数	α'	—	1.05	1.05	1.05	1.05
出口过量空气系数	α''	—	1.05	1.05	1.05	1.05
烟气入口温度	θ'	$^{\circ}C$	1585.1455	891.54175	528.28467	289.1582336
烟气出口温度	θ''	$^{\circ}C$	891.54175	528.33063	289.19589	95.89831543
工质出口温度	t''	$^{\circ}C$	75.149612	67.505798	63.894146	61.68637085
工质进口温度	t'	$^{\circ}C$	67.516281	63.894939	61.686371	60
烟气平均速度	w_y	m/s	7.1193987	4.6303827	3.9598175	4.698112992
工质平均速度	w_2	m/s	0.5609846	0.5591812	0.4245375	0.544550808
辐射放热系数	α_r	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C)$	11.756014	5.4068992	2.0839734	—
烟气侧对流放热系数	α_h	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C)$	88.264529	68.254661	63.301826	35.49007473
工质侧对流放热系数	α_2	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C)$	3199.0316	3090.1065	2439.8804	2946.879212
传热系数	K	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C)$	70.39405	61.154532	54.127382	24.04280708
平均温压	ΔT	$^{\circ}C$	1109.8348	615.44142	323.83576	96.59330479
计算传热量	Q_{ch}	kcal/kg	3121.8666	1503.957	920.44327	703.9884177
热平衡吸热量	Q_{ph}	kcal/kg	3123.0899	1503.7469	920.62578	704.0898407
热量相对误差	e	%	0.0391671	-0.0139745	0.0198245	0.01440485

三、锅炉热力计算总结

- (1) 做热力计算时，一般采用试凑方法。即根据已知的烟气温度和受热介质的温度，假设未知的烟气温度或受热介质的温度，然后按热量平衡确定各部件的吸热量，计算传热系数和温差，并由换热方程式求出受热面的数值。
- (2) 各部件计算合格的标准是：
 - 炉膛：假设的炉膛出口烟气温度与求得的出口烟气温度误差在 $\pm 100^{\circ}\text{C}$ 以内，
 - 凝渣管：由热平衡方程式求得的热量与按传热方程式求得的热量之比在 $\pm 5\%$ 以内，
 - 其他部件：由热平衡方程式求得的热量与按传热方程式求得的热量之比在 $\pm 2\%$ 以内。
- (3) 如果锅炉整体计算误差 ΔQ 超过允许值，应该首先校对温焓表和每个部件的计算，温度和焓是否正确对应，而不应该去检查传热计算是否正确。

四、参考资料

- [1] 车得福，锅炉（第三版），西安交通大学出版社，2021
- [2] 锅炉机组热力计算标准方法(73年)
- [3] 锅炉热力计算标准方法（98版）
- [4] 赵钦新，燃油燃气锅炉，西安交通大学出版社，2000
- [5] 林宗虎，热水锅炉手册，机械工业出版社，1994
- [6] 冯俊凯等，锅炉原理及计算（第三版），科学出版社，2003
- [7] 黄建春，2.1MW热水机组热力计算表，内部资料
- [8] 宋贵良，锅炉计算手册，辽宁科学出版社，1995
- [9] 渝石网络：<http://www.fishsting.com/>

五、致谢

一分耕耘，一分收获。经过将近五天的学习和总结，关于锅炉机组热力计算技术讲座基本完成，此时，虽感欣慰，但是更多的是感谢，感谢西安交通大学车得福教授给与的指导和帮忙，同时还要感谢上海交通大学于立军教授一直在默默地关注该讲座的进展，最后感谢公司的领导和同事对我工作上的支持和生活上的关心，正是由于他们的无私的奉献和热情的鼓励，才使我鼓足了干劲，高效地完成了这次讲座的编写，借此机会，向他们致以崇高的敬意和衷心的感谢，祝各位专家和同仁在以后的生活和工作中一帆风顺，事事顺心，家庭幸福。

由于本人的学识和理解有限，该讲座中难免存在遗漏、失误及错误，敬请广大朋友批评和指正，在此一并表示感谢！

学生：黄建春

2022年8月

谢谢!

电话：15730252870

邮箱：hjc13404@163.com