

## 作业 2

**一、任务：**根据给定的发电厂热力系统及其锅炉、汽轮机、辅助设备等技术资料(THA 工况)能够提炼出焓分析需要的各种原始数据，并整理成本课程要求的形式。对于资料中没有的数据，能够依据所学知识，说明其取值原则及依据。在此基础上，进行发电厂系统及设备焓分析与计算。

**二、研究对象：**600MW、1000MW 火电机组（见附件）

### 三、计算任务

1. 列出锅炉设备的焓平衡方程，计算其焓损失及焓效率；
2. 管道系统焓平衡方程，计算其焓损失及焓效率
3. 列出各级加热器的焓平衡方程，计算其焓损失及焓效率
4. 列出汽轮机装置（包括汽轮机本体、凝汽器等）的焓平衡方程，计算其焓损失及焓效率；
5. 列出全厂焓平衡方程，计算全厂焓损失及焓效率。

**四、要求：**数据整理采用表格形式。

### 五、计算参考资料：

- 1、PPT 讲义：7-火电厂热力系统及设备的焓分析
- 2、计算示例：如下

的产  
效率  
度。  
也是  
热过  
的端  
失，  
损失

(4) 换热温度水平 在保持式(5-42)中其它条件不变时，加热器中换热的温度水平越高，则温差换热所造成的熵损失越小。

上面所得到的几点结论，为我们降低加热器中温差换热熵损失的数量指出了努力方向。采用抽汽冷却器，就是通过减小加热器端差而使整个加热器熵损失减少的一种措施。

图5-16示出了抽汽冷却器的两种常见的连接方式。图5-17则表示了加装抽汽冷却器后给水吸热过程线的变化。可以看出，由于抽汽冷却器使得整个加热器端差减小（甚至可以成为负值），从而可明显地使其换热的熵损失降低。

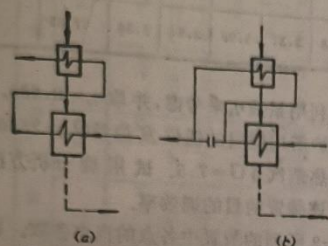


图 5-16 抽汽冷却器的两种连接方式

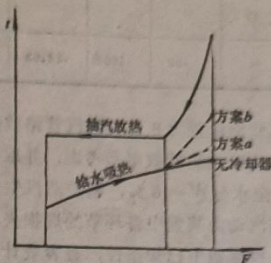


图 5-17 抽汽冷却器中介质温度的变化过程

总之，采用给水回热的蒸汽动力装置较简单蒸汽动力装置在热力学完善性上大大地改进了。但需注意，实践上所得收益，较理论上能给出的收益要低。这是因为在实现这种回热循环时，还会带来一些附加的熵损。因此，在具体应用这种循环时，必须设法最大限度地减小这些附加的熵损。

## 第五节 具有再热和回热的蒸汽动力装置的熵损计算

以国产N125-135/550/550型机组为例进行分析，其热力系统如图5-18所示，设计工况下的有关参数列在表5-1中。已知锅炉效率 $\eta_b^0=0.911$ ，汽轮机机械效率 $\eta_m=0.98$ ，发电机效率 $\eta_g=0.985$ ，凝结泵出口压力 $p_{c,p}=1.18\text{MPa}$ ，给水泵出口压力 $p_{p,s}=16.67\text{MPa}$ ，

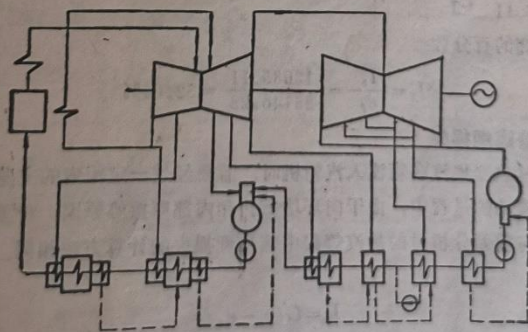


图 5-18 N125-135/550/550型汽轮机组热力系统

表 5-1 N125-135/550/550型汽轮机设计工况下有关参数

项 目	单 位	锅炉出口 蒸汽入口	汽 轮 机 入口蒸汽	再热蒸汽	抽 汽							排 汽	环 境
					1	2	3	4	5	6	7		
压 力	MPa	13.83	13.24	2.55/2.29	3.64	2.55	0.77	0.46	0.25	0.07	0.016	0.005	0.01
温 度	℃	555	550	331/550	375.4	331	394	326	255	135	$x=0.975$	$x=0.942$	0
加热器 端 差	℃				0	1	0	1	3	3	3		
流 量	%	100	100	84.08	4.40	11.52	1.66	3.37	5.00	3.84	2.36	67.83	

另设抽汽管路压损为 8%，抽汽管路散热损失以焓的利用系数 $\eta_a$ 来考虑，并取 $\eta_a=0.985$ ，加热器散热以加热器效率来考虑，并取 $\eta_h=0.98$ ，锅炉所用燃料的低位发热量 $Q_L=25000$  kJ/kg，全水分 $W=6\%$ ，锅炉蒸汽生产率（包括再热蒸汽） $G=7.5$ 。试用焓分析方法计算该蒸汽动力装置中各环节的焓损失，并最终求出该装置的目的焓效率。

解：根据题中已知条件，查表或计算可以得表 5-2 所列的装置中各点的汽水参数。以 1kg 燃料为计算基础，分别计算于下：

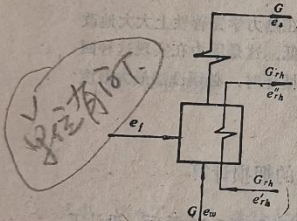


图 5-19 锅炉焓平衡示意图

故  $I_b = 25146.28 + 7.5 \times 309.11 + 6.3060 \times (1236.36 - 1524.83) - 7.5 \times 1674.72$   
 $= 13085.11$  kJ

损失占燃料焓的百分数

$$\delta I_b = \frac{I_b}{e_f} = \frac{13085.11}{25146.28} = 52.04\%$$

## 二、主蒸汽管道焓损失

蒸汽从锅炉过热器集汽联箱流入汽轮机时，需要经过一定距离的主蒸汽管道。而蒸汽在主蒸汽管道中流动的过程中，由于向环境散热和内部摩擦等原因，将造成焓的损失。这种损失的计算与前面分析过的抽汽管路中蒸汽焓损失的计算方法相同。按照式(5-35)，有

$$I_p = G(e - e')$$

式中 $e'$ 为进入汽轮机时蒸汽的焓，则



表 5-2

装置中各有关点的汽水参数

项 目	符 号	单 位	数据来源	锅 炉 出口蒸汽	汽 轮 机 进口蒸汽	再热蒸汽	回 热 抽 汽							排 汽
							1	2	3	4	5	6	7	
压 力	$p$	MPa	已 知	13.83	13.24	2.29	3.64	2.55	0.77	0.46	0.25	0.07	0.016	0.005
温 度	$t$	℃	已 知	555	550	550	375.4	331	394	326	255	135	$x=0.975$	$x=0.942$
蒸 汽 焓	$h_s$	kJ/kg	查 表	3473.79	3466.67	3574.69	3164.38	3083.16	3255.66	3119.58	2979.75	2749.05	2541.39	2419.97
蒸 汽 熵	$s_s$	kJ/(kg·K)	查 表	6.5863	6.5963	7.5044	6.3179	6.7621	7.5722	7.5944	7.6325	7.7029	7.8130	7.9428
蒸 汽 烟	$e_s$	kJ/kg	计 算	1674.72	1665.09	1524.83	1324.28	1236.36	1186.96	1045.03	894.72	644.77	407.42	250.16
加热器入口汽焓	$h_1'$	kJ/kg	计 算				3101.16	3021.61	3190.34	3057.20	2920.29	2694.21	2490.73	
加热器入口蒸汽压力	$p_1'$	MPa	计 算				3.35	2.35	0.59	0.42	0.23	0.066	0.0015	
加热器入口蒸汽熵	$s_1'$	kJ/(kg·K)	查 表				6.6692	6.7013	7.5876	7.5295	7.5705	7.6268	7.8332	
加热器入口蒸汽烟	$e_1'$	kJ/kg	计 算				1279.47	1195.12	1117.79	1000.52	852.41	610.95	351.09	
加热器饱和水温	$t_s$	℃	查 表				240.02	220.58	158.08	145.54	124.07	88.29	53.59	
加热器饱和水焓	$h_{ws}$	kJ/kg	查 表				1037.91	946.22	667.38	612.95	520.84	369.74	224.37	
加热器端差	$\delta_1$	℃	已 知				0	1	0	1	3	3	3	
加热器出口水温	$t$	℃	计 算				240.02	219.58	158.08	144.54	121.07	85.29	50.59	
加热器出口水焓	$h_1''$	kJ/kg	查 表				1039.58	946.22	667.38	609.18	509.11	357.93	212.65	136.32
加热器出口水熵	$s_1''$	kJ/(kg·K)	查 表				2.6743	2.4886	1.9232	1.7847	1.5380	1.1363	0.7105	0.4715
加热器出口水烟	$e_1''$	kJ/kg	计 算				309.11	266.49	142.05	121.67	89.01	47.52	18.59	7.5279
加热器疏水温度	$t_d$	℃	计 算				227.58	166.08		145.54	124.07	88.29	53.59	
加热器疏水焓	$h_d$	kJ/kg	查 表				978.87	702.96		612.95	519.46	369.74	224.29	
加热器疏水熵	$s_d$	kJ/(kg·K)	查 表				2.5866	2.0009		1.7961	1.5713	1.1726	0.7500	
加热器疏水烟	$e_d$	kJ/kg	计 算				272.35	156.42		122.34	91.61	49.45	19.4854	

注 带疏水冷却段加热器的入口端差取为8℃。

无化器用时,  $e = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) = (h - h_0) - T_0 (s - s_0)$ ,  $(\frac{1}{h, s \text{ 单位}})$

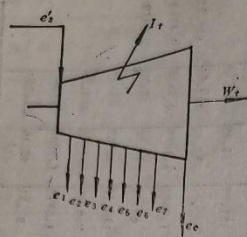


图 5-20 汽轮机焓平衡示意图

$$I_p = 7.5 \times (1674.72 - 1665.09) = 72.23 \text{ kJ}$$

损失占燃料焓的百分数

$$\delta I_p = \frac{I_p}{e_t} = 0.29\%$$

### 三、汽轮机装置焓损失

汽轮机装置的焓损失可分成以下几个部分。

(一) 汽轮机内部焓损失

汽轮机焓平衡如图5-20所示，其焓平衡方程应

为

$$Ge'_t = W_t + \sum_{j=1}^7 G_j e_j + G_c e_c + I_t$$

所以

$$I_t = Ge'_t - W_t - \sum_{j=1}^7 G_j e_j - G_c e_c$$

而

$$\begin{aligned} W_t &= G[(h_1 - h_2) - \sum_{j=1}^7 \alpha_j (h_j - h_2)] \\ &= 7.5 \times [(3466.67 - 2419.97) - 0.043993 \times (3164.38 - 2419.97) \\ &\quad - 0.115206 \times (3083.16 - 2419.97) - 0.016600 \times (3255.66 - 2419.97) \\ &\quad - 0.033742 \times (3119.58 - 2419.97) - 0.050044 \times (2979.75 - 2419.97) \\ &\quad - 0.023640 \times (2541.39 - 2419.97)] \\ &= 6424.07 \text{ kJ} \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} I_t &= 7.5 \times 1665.09 - 6424.07 - 7.5(0.043993 \times 1324.28 \\ &\quad + 0.115206 \times 1236.36 + 0.0166 \times 1186.96 + 0.033742 \times 1045.03 \\ &\quad + 0.050044 \times 894.72 + 0.038428 \times 644.77 + 0.02364 \times 407.42) \\ &\quad - 0.678347 \times 7.5 \times 250.16 \\ &= 2280.06 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(二) 乏汽在凝汽器中的焓损失

$$\begin{aligned} I_c &= G_c(e_c - e_{cw}) \\ &= 0.678347 \times 7.5 \times (250.16 - 7.5279) \\ &= 1234.42 \text{ kJ} \end{aligned}$$

(三) 抽汽管路焓损失

依照式(5-35)，抽汽管路焓损失为

$$\begin{aligned} I_{sp} &= \sum_{j=1}^7 I'_{tj} \\ &= \sum_{j=1}^7 G_j(e_j - e'_j) \\ &= 7.5 \times [0.043993 \times (1324.28 - 1279.47) + 0.115206 \\ &\quad \times (1236.36 - 1195.12) + 0.0166 \times (1186.96 - 1117.79) \\ &\quad + 0.033742 \times (1045.03 - 1000.52) + 0.050044 \\ &\quad \times (894.72 - 852.41) + 0.038428 \times (644.77 + 610.95)] \end{aligned}$$



$$+0.02364 \times (407.42 - 351.09)] \\ = 105.90 \text{ kJ}$$

#### (四) 加热器组焓损失

为了计算简便起见, 我们将整个回热系统的加热器高压加热器组、低压加热器组和除氧器三部分, 以焓平衡方程的求解分别计算属于加热器组的焓损失。

##### 1. 高压加热器组

如图5-21所示, 取点划线框内的计算单元, 列出高压加热器组的焓平衡方程为

$$G_1 e_1' + G_2 e_2' + G e_w' = G e_w'' + (G_1 + G_2) e_d' + I_H$$

$$\begin{aligned} \text{故 } I_H &= 7.5 \times [0.043993 \times 1279.47 + 0.115206 \times 1195.12 + 142.05 \\ &\quad - 309.11 - (0.043993 + 0.115206) \times 156.42] \\ &= 15.08 \text{ kJ} \end{aligned}$$

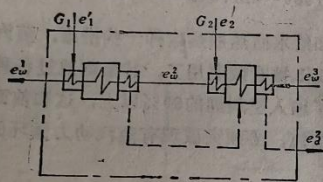


图 5-21 高压加热器组系统

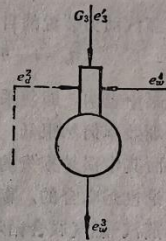


图 5-22 除气器焓平衡示意图

##### 2. 除氧器

如图5-22所示, 除氧器的焓平衡方程为

$$\begin{aligned} I_b &= G_3 e_3' + (G - G_1 - G_2 - G_3) e_w' + (G_1 + G_2) e_d' - G e_w'' \\ &= 7.5 \times [(121.67 - 10.043993 + 0.115206)(121.67 - 156.42) \\ &\quad - 0.0166 \times (121.67 - 1117.79) - 142.05] \\ &= 12.66 \text{ kJ} \end{aligned}$$

##### 3. 低压加热器组

如图5-23所示, 依据与高压加热器组相同的道理, 列出低压加热器组的焓平衡方程为

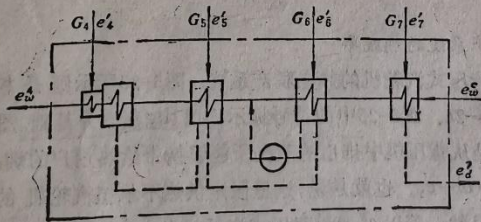


图 5-23 低压加热器组系统

$$\begin{aligned}
 I_L &= G_1 e_1' + G_2 e_2' + G_3 e_3' + G_4 e_4' + (G_5 + G_7) e_5' - G_6 e_6' - G_8 e_8' \\
 &= 7.5 \times [0.033742 \times 1000.52 + 0.050044 \times 852.41 + 0.023640 \times 351.09 \\
 &\quad + 0.038428 \times 610.95 + (0.678347 + 0.023640) \times 7.5279 \\
 &\quad - 0.023640 \times 19.4854 - 0.824201 \times 121.6] \\
 &= 95.54 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

因此整个汽轮机装置的烟损失为

$$\begin{aligned}
 I_{L\pi} &= 2280.06 + 1234.42 + 105.9 + 15.08 + 12.66 + 95.54 \\
 &= 3743.66 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

损失占燃料烟的百分数

$$\delta I_{L\pi} = \frac{I_{L\pi}}{e_f} = \frac{3743.66}{25146.28} = 14.89\%$$

因此整个蒸汽动力装置的目的烟效率应该是

$$\eta_p = 1 - 0.5204 - 0.0029 - 0.1489 = 32.78\%$$

上述计算集中表明,即使采取了蒸汽中间再热和给水回热加热这样一些措施,蒸汽动力装置的目的烟效率仍然很低,输入燃料的烟只有 1/3 被有效利用了,其余则通过各种途径损失掉了。而其中锅炉损失的烟尤为严重,占到了输入燃料烟的 50% 以上,这和前面反复论述过的结论也是吻合的,彻底改变这一状况的措施,必须突破现有蒸汽动力循环的模式,比如发展蒸汽-燃气联合循环等等。

## 第六节 热电联产系统的烟评价

采用供热式汽轮机,实现电能和热能的联合生产这种生产方式,无论是在热力学完善性方面还是在经济性乃至更广泛的社会效益方面都是极受推崇的。确实,这种热电联产方式在得到合理运用的条件下,对节约能源,改善环境等诸多方面会使我们大为得益。这一节将以烟分析的方法对热电联产系统加以分析和评价,然后给出一个热电联产系统烟分析的计算实例。

### 一、热电联产系统的热经济收益

热电联产系统热经济收益的评价,必须以热电分产在能量供应相同的条件为基础来进行比较,烟分析方法也不例外。所以先来分析讨论热电联产与热电分产两种不同生产方式的烟效率问题。

#### (一) 热电联产系统的烟效率

图5-24所示为背压式汽轮机的热电联产系统,图5-25所示则是相应背压式汽轮机的 Grassmann图。图5-24、图5-25中的符号标示均以 1kg 蒸汽为基础。图5-25中的  $e_1$  是 1kg 蒸汽的物理烟; $e_2$  则是从背压机中排出的蒸汽所能够携带给热用户的烟; $i_E$  则是背压机发电的烟损失, $i_E = e_1 - w - e_2$ 。也就是说,这里假定供热不承担汽轮机的烟损失,而将全部损失归到发电方面。显然,若以  $\eta_p^E$  表示背压式汽轮机发电方面的目的烟效率,则  $\eta_p^E < 1$ ;