



廣東工業大學

GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



供暖过程焓经济分析

成员：孔令辉 谢驰 兰志文 吴先桐 罗思佳 陈江颖 俞越瀚 何博昊



廣東工業大學

GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

目录

CONTENT

01

热电联产

02

吸收式热泵

03

空气源热泵

04

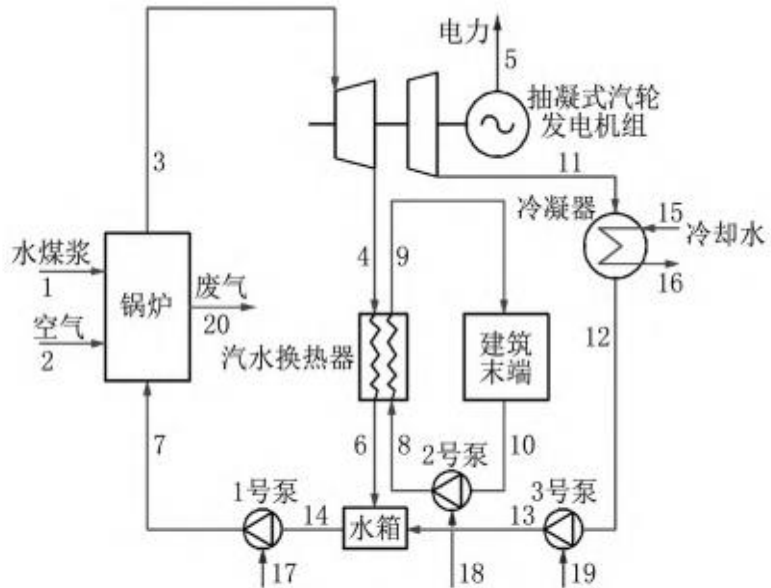
燃煤锅炉



01 热电联产

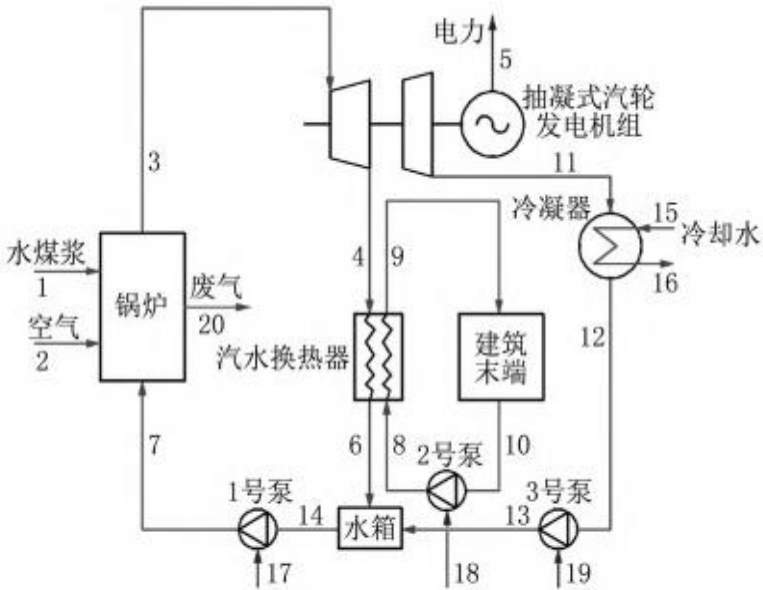


- **热电联产**是以热电厂作为热源的供热方式，即由热电厂产生的能源，一部分提供电能，而另一部分提供热能，它是一项能源综合利用技术。热电联产不仅可以节约能源，而且在运行时可以减少二氧化碳的排放，具有节能环保、供热质量稳定及电力供应增强的综合效益，和国家可持续发展战略相一致。就经济效益和社会效益方面考虑，热电联产是极好的供热方式。



热电联产集中供暖系统流程图

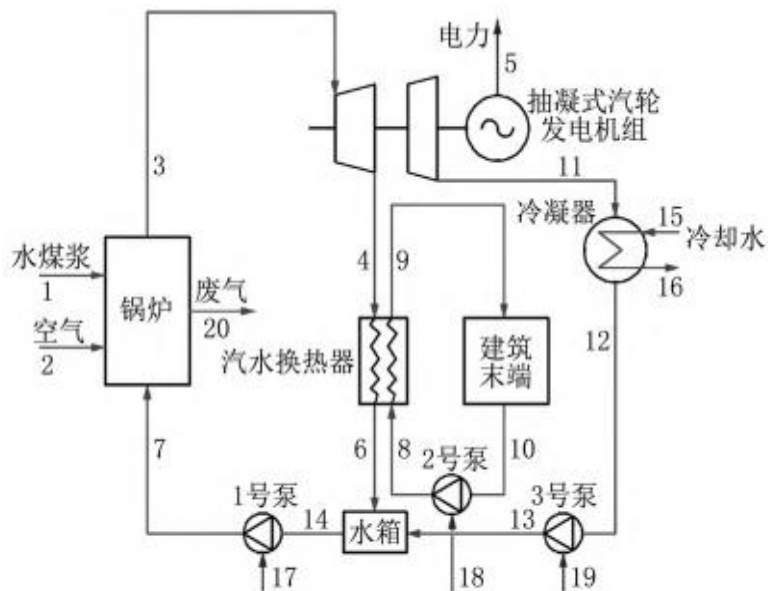
左图是热电联产的原理图，从图中可以看出锅炉产生的蒸汽一部用作发电，一部分用作供暖；并且，整个系统中，水作为工质一直在系统中循环，在汽轮机中膨胀之后的乏汽经过冷凝之后又回流到水箱，蒸汽在经过换热器换热之后的冷凝成水回流到水箱。



热电联产集中供暖系统流程图

系统各部件的烟分析

	$\dot{E}_F$	$\dot{E}_P$	$\dot{E}_D$	ϵ
水煤浆 锅炉	$\dot{E}_1 + \dot{E}_2$	$\dot{E}_3 - \dot{E}_7$	$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_7 - \dot{E}_3 + \dot{E}_{20}$	$\frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_7}{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}$
汽轮发 电机组	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4 - \dot{E}_{11}$	$\dot{E}_5$	$\dot{E}_3 - \dot{E}_5 - \dot{E}_4 - \dot{E}_{11}$	$\frac{\dot{E}_5}{\dot{E}_3 - \dot{E}_4 - \dot{E}_{11}}$
汽水换 热器	$\dot{E}_4 - \dot{E}_6$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$	$\dot{E}_4 + \dot{E}_8 - \dot{E}_9 - \dot{E}_6$	$\frac{\dot{E}_9 - \dot{E}_8}{\dot{E}_4 - \dot{E}_6}$
1 号泵	$\dot{E}_{17}$	$\dot{E}_7 - \dot{E}_{14}$	$\dot{E}_{17} + \dot{E}_{14} - \dot{E}_7$	$\frac{\dot{E}_7 - \dot{E}_{14}}{\dot{E}_{17}}$
2 号泵	$\dot{E}_{18}$	$\dot{E}_8 - \dot{E}_{10}$	$\dot{E}_{18} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_8$	$\frac{\dot{E}_8 - \dot{E}_{10}}{\dot{E}_{18}}$
3 号泵	$\dot{E}_{19}$	$\dot{E}_{13} - \dot{E}_{12}$	$\dot{E}_{19} + \dot{E}_{12} - \dot{E}_{13}$	$\frac{\dot{E}_{13} - \dot{E}_{12}}{\dot{E}_{19}}$
冷凝器			$\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12}$	



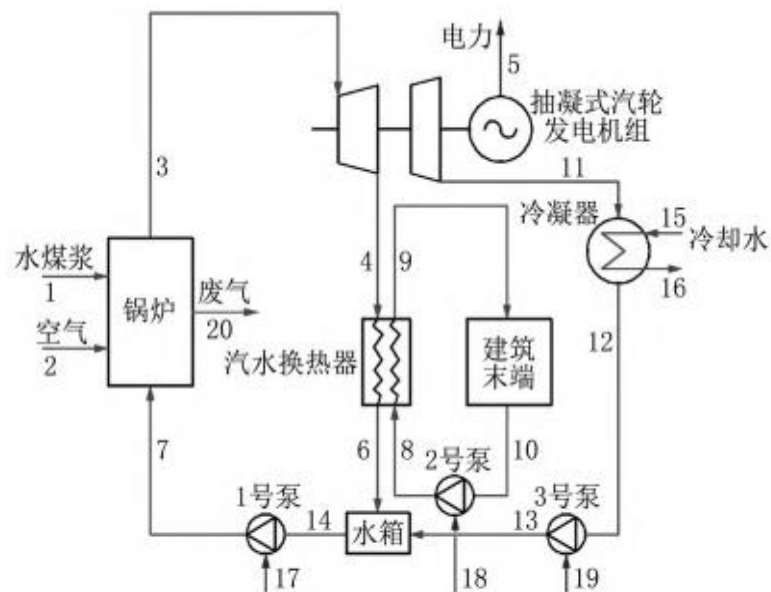
热电联产集中供暖系统流程图

烟分析的计算结果

经计算可得，系统的烟效率
32.1%，各部件的最高和最低烟效率分别为汽轮发电机组76.5%，换热部件16.3%

系统各部件的烟损率，锅炉占
49.39%，汽水换热器为31.74%，发电机组12.12%

热电联产系统的改进措施



热电联产集中供暖系统流程图

分析整个系统提出一下改进措施

1) 利用废气的热量去预热进入锅炉的水，减小温差。

2) 利用废气带动增压器加压空气，达到燃料充分燃烧的目的。



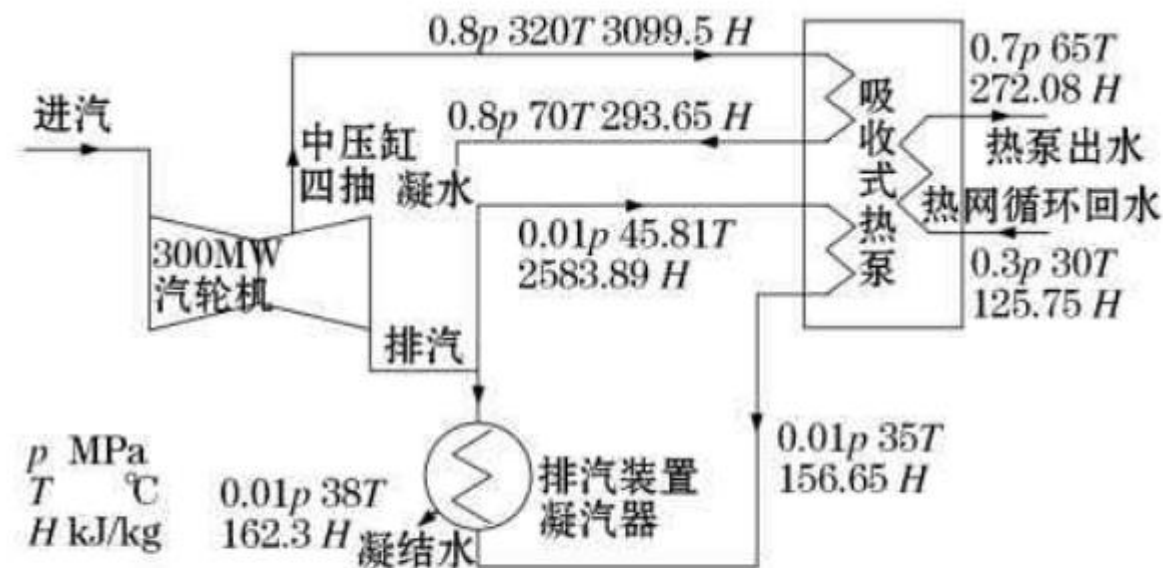
02 吸收式热泵分析



火电厂在发电过程中，将燃料的化学能先转变成蒸汽携带的热能，再由热能转变为汽轮机的机械能，最后由发电机将机械能转变为电能供给用户，在将燃料化学能转变为电能的过程中，存在各种不可逆的损失，如不完全燃烧热损失，锅炉及各种换热器的散热损失，发电设备的机械能损失等，在这里面，最大的能量损失是乏汽冷凝热损失，它占到总热量的 50% ~ 60% 以上，这部分热量就以热能的形式排放到环境中，形成热污染，最终只有约 35% 的能量转变成电能，如果机组容量为 300 MW，蒸汽量为 1000 t/h 的直接空冷机组，凝汽热损失约为 1.38×10^9 kJ/h，折合标煤 47.1 t/h，这部分能量直接排入周围大气，会导致环境温度明显升高，如果利用这部分能量实现集中供热，则可避免分散取暖锅炉的效率低下，空气污染严重的缺点。

吸收式热泵分析

根据图可知溴化锂吸收式热泵回收排汽余热系统共有 8 个火用流组成，分别经过汽轮机中压缸、低压缸、排汽装置、凝汽器、吸收式热泵，它由三个主要的火用流组成：一是从中压缸四段抽汽经过吸收式热泵放热，凝结水流回到 6 号低压加热器，二是汽轮机低压缸出来的乏汽一部分经过吸收式热泵放热，乏汽凝结后流回到凝结水系统，另一部分直接进入凝汽器冷凝，凝结水回到凝结水系统中，三是热网循环回水进入吸收式热泵加热，循环水被加热后流到下一级加热器，因排汽装置的热力学完善度较好排汽装置进口蒸汽参数和空冷凝汽器进口蒸汽参数相差不大，所以在分析中将排汽装置和凝汽器放在一起考虑，因此，该系统的灰箱模型可以简化为如下图所示



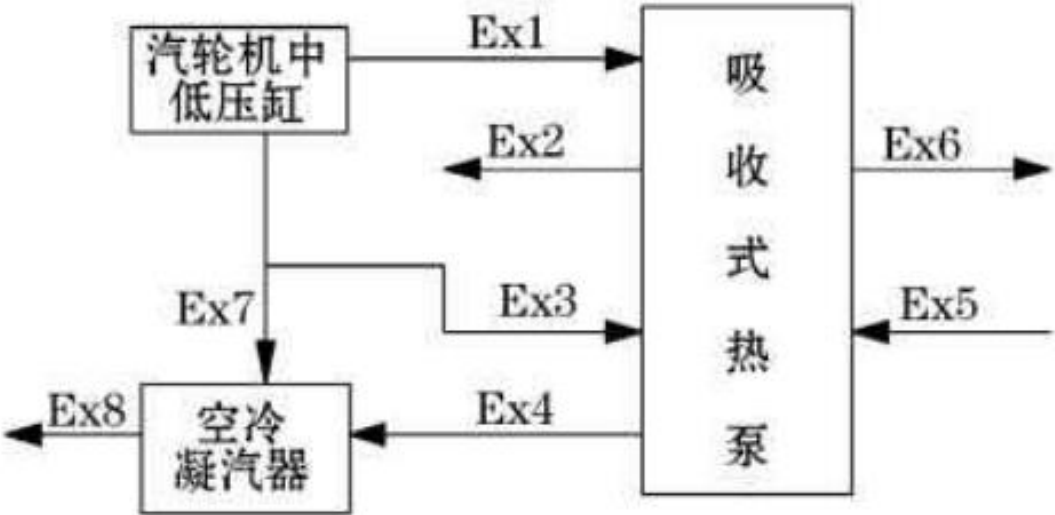
收式热泵系统的原则性热力系统图

Principled thermal system diagram
of absorption heat transformer



热泵利用排汽供热主要参数
Main parametersforheatpump using
exhauststeam heating

项目	数值
机组机械效率/%	99
发电机效率/%	99
抽汽压力/MPa	0.8
抽汽温度/℃	320
抽汽凝结水温度/℃	70
气轮机排汽压力/kPa	10
汽轮机排气温度/℃	45.81
供热回水温度/℃	30



吸收式热泵回收排汽余热灰箱模型
Gray box model of absorption heat pump
to recycle exhausted heat



吸收式热泵分析

各状态点火用值: $E_i = H_i - H_0 - T_0(S_i - S_0)$

火用平衡方程: $E_{x1} + E_{x3} + E_{x5} = E_{\text{rxirr}} + E_{g2}E_{x4} + E_{x6}$

吸收式热泵的热力完善度: $\varepsilon_{\text{xr}} = \frac{E_{x6}}{E_{x1} + E_{x3} + E_{x5}} \times 100\%$

空冷凝汽器的热力学完善度: $\varepsilon_{\text{xn}} = \frac{E_{x8}}{E_{x4} + E_{x7}} \times 100\%$

吸收式热泵供热系统的总火用损: $\sum E_{\text{xxirr}} = E_{\text{rxirr}} + E_{\text{nxirr}} + E_{x2}$

吸收式热泵火用效率: $\eta_{\text{xr}} = \frac{E_{x6}}{E_{x1} + E_{x3}} \times 100\%$

吸收式热泵火用损率: $e_{\text{xr}} = \frac{E_{\text{rxirr}}}{\sum E_{\text{xxirr}}} \times 100\%$

吸收式热泵火用损系数: $\lambda_{\text{xr}} = \frac{E_{x2} + E_{\text{rxirr}}}{E_{x1} + E_{x3} + E_{x5}} \times 100\%$

空冷凝汽器火用效率: $\eta_{\text{xn}} = \frac{E_{x8}}{E_{x4} + E_{x7}} \times 100\%$

空冷凝汽器火用损率: $e_{\text{xn}} = \frac{E_{\text{nxirr}}}{\sum E_{\text{xxirr}}} \times 100\%$

空冷凝汽器火用损系数: $\lambda_{\text{xn}} = \frac{E_{\text{nxirr}}}{E_{x1} + E_{x3} + E_{x5}} \times 100\%$



吸收式热泵分析



参数	烟损失 $/(MJ \cdot h^{-1})$	热力学 完善度/%	烟效率 /%	烟损率 /%	烟损系数 /%
吸收式热泵	34 121.9	62.6	64.3	26.6	36.2
空冷凝汽器	89 386.9	1.5	1.5	72.4	94.7

热泵回收排汽余热可有效利用乏汽余热，在供热系统中，空冷凝汽器的火用损失最大，热力学完善度、火用效率较小，火用损系数最大，表明汽流流经空冷凝汽器时损失了很大一部分汽化潜热，这是因为两套系统都未能最大程度的利用排汽余热。



03 空气源热泵开放式分析



空气源热泵介绍

空气源热泵是以室外空气作为热源，从室外空气中吸取热量，经热泵提高温度后送入室内供暖。

优点

空气是可再生的清洁能源，取之不尽，用之不竭，且可免费使用，是较为理想的低品位热源。而且空气源热泵无需特设机房，可布置在室外，不占用建筑物室内使用面积，安装方便，便于管理。

缺点

当室外空气的温度变化幅度较大，而空气源热泵的供热能力和供热性能系数受室外气温的限制，随室外气温的降低而降低。因此，建筑物采用空气源热泵供热时，需设置补充加热的装置。



空气源热泵工作原理

1、压缩过程

蒸发后的运行工质被吸入压缩机，通过压缩机的压缩功能，将工质压缩成高压高温气体，使其对于较低温度的自来水易于放热、液化。

2、冷凝过程

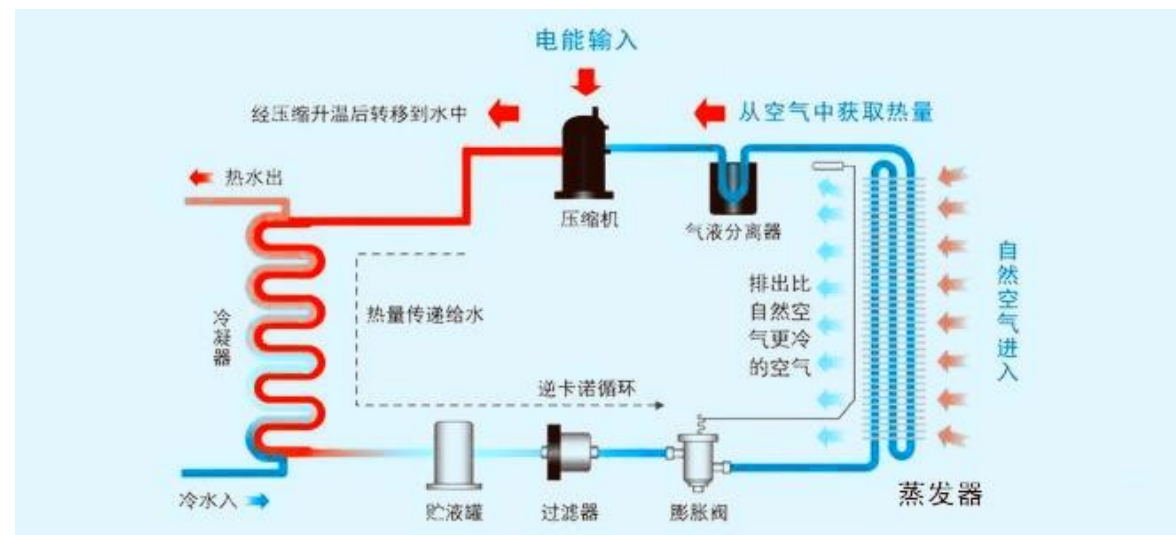
从压缩机排出的高压高温工质被常温的自来水吸收热量而变成的液态工质。

3、节流过程

把液化后的工质送入热泵主机蒸发器之前，利用毛细管的压力差，使工质在保温水箱的冷凝器内冷凝降压，将它变成即使在低温下也易于蒸发的状态。

4、蒸发过程

液态工质从周围空气中吸收热量而不断蒸发汽化，被吸收热量后的空气变为“冷气”。





空气源热泵焓分析



热泵机组的焓平衡式为：

$$E_{xQ_a} + W = E_{xQ} + \sum \Pi_i$$

式中： E_{xQ_a} — 从热源吸收的热量中的焓值， kW ；

W — 热泵机组的输入功率， kW ；

E_{xQ} — 热泵机组所提供的热量中的焓值， kW ；

$\sum \Pi_i$ — 热泵机组的焓损， kW 。

所以热泵机组的焓效率为：

$$\eta_e = \frac{E_{xQ}}{E_{xQ_a} + W} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q}{\left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) Q_a + W}$$



空气源热泵焓分析



热泵空调器是以环境作为热源，即 $t_a = t_0$ ；本例以武汉地区为例，冬季空调室外计算温度为 $t_0 = -2.4^\circ\text{C}$ ，则 $T_0 = 273 - 2.4 = 270.6\text{K}$ ；室内设计温度为 $t = 18^\circ\text{C}$ ，则 $T = 273 + 18 = 291\text{K}$ 热泵空调器的性能系数 $\text{COP} = 3.10$ ，代入下式可得热泵空调器焓效率为： $\eta_e = 22\%$

$$\eta_e = \frac{E_{xQ}}{E_{xQ_a} + W} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q}{\left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right)Q_a + W}$$



04 燃煤锅炉



燃煤锅炉介绍

锅炉是利用燃料或其他能源的热能把水加热成为热水或蒸汽的机械设备。锅炉包括锅和炉两大部分，锅炉中产生的热水或蒸汽可直接为工业生产和人民生活提供所需要的热能，也可通过蒸汽动力装置转换为机械能，或再通过发电机将机械能转换为电能。提供热水的锅炉称为热水锅炉，主要用于生活，工业生产中也有少量应用。产生蒸汽的锅炉称为蒸汽锅炉，常简称为锅炉，多用于火电站、船舶、机车和工矿企业。

燃煤锅炉是指燃料燃烧的煤，煤炭热量经转化后，产生蒸汽或者变成热水，但并不是所有的热量全部有效转化，有一部分无功消耗，这样就存在效率问题。



燃煤锅炉焓分析

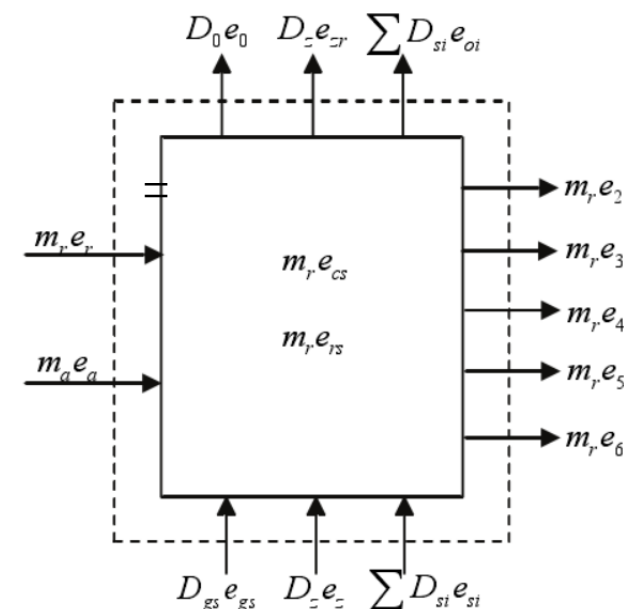
基于焓分析原理，依据锅炉焓分析控制体模型，建立锅炉的焓平衡方程：

$$m_r e_r + m_a e_a = (D_0 e_0 - D_{gs} e_{gs}) + D_z (e_{zr} - e_z) + \sum D_{si} (e_{oi} - e_{si}) + m_r (e_{rs} + e_{cs}) + m_r (e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6)$$

则锅炉焓损失：

$$I_b = \sum E_{\text{内部火用损}} + \sum E_{\text{外部火用损}} = m_r (e_{rs} + e_{cs}) + m_r (e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6)$$

=



燃煤锅炉焓分析

(1) 燃料火用 e_r 的计算:
$$e_r = Q_L (1.0064 + 0.1519 \frac{H}{C} + 0.0616 \frac{O}{C} + 0.0429 \frac{N}{C})^{[3]} \quad (4)$$

式中 Q_L 为燃料的低位发热量(KJ/kg), H、O、N、C 为燃料中氢、氧、氮、碳的质量百分数。

(2) 空气火用 e_a 的计算:
$$e_a = (h_a - h_0) - T_0(s_a - s_0) = c_p(T_a - T_0) - T_0(c_p \ln \frac{T_a}{T_0} - R \ln \frac{p_a}{p_0}) \quad (5)$$

该项存在与否可根据具体情况考虑^[4]。

(3) e_{gs} 、 e_z 、 e_0 、 e_{si} 、 e_{-r} 各火用值用 $e = h - h_0 - T_0(s - s_0)^{[2]}$ 计算或直接由有关图表[5]查得。

(4) $m_r(e_{rs} + e_{cs})$ 为锅炉内部火用损, 燃烧火用损是由于燃料将高质量的化学能转变为热能, 然后加热低温燃料和空气而产生的, 其大小主要取决于理论绝热燃烧温度。计算式为^[6]

$$e_{rs} = Q_L (1 - T_0 / T_{jr}) \quad (6)$$

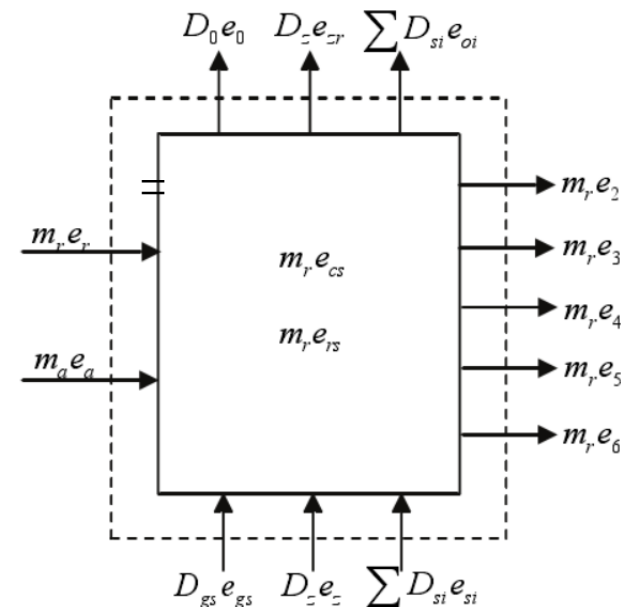
其中 $T_{jr} = T_0 + [Q_L + c_f(T_f - T_0)] / v_{yq} c_p$; T_0 为环境温度; T_{jr} 为绝热燃烧温度; c_f 为燃料体积比热容; T_f 燃料温度; v_{yq} 为燃烧单位体积燃料产生的烟气, m^3 / m^3 ; c_p 为烟气的平均体积定压比热容, KJ / m^3 。

传热火用损失的大小与传热温差密切相关, 传热温差越大, 传热火用损失越大。计算式为^[7]:

$$e_{cs} = QT_0(1/\overline{T_c} - 1/\overline{T_h}) \quad (7)$$

Q 为传热量, kJ/kg ; $\overline{T_c}$ 、 $\overline{T_h}$ 冷热流体的平均温度。

(5) $m_r(e_2 + e_3 + e_4 + e_5 + e_6)$ 锅炉外部火用损失, 按照火用的基本定义, 一定的热量中所含火用的数量等于在只有环境参与的条件它所做出的最大功, $e_i = Q_i(1 - T_0/T_i)$, 其中 Q_i ($i=2、3、4、5、6$) 计算公式可参考文献[6], T_i 为这些热量所处温度。





燃煤锅炉烟分析



以高井#7 炉 HG—410/100— 1型燃煤锅炉为研究对象，该锅炉按燃用大同烟煤和京西混煤设计。配钢球磨煤机中储式制粉系统。以 100MW 负荷为例，煤中各元素的质量分数可通过实测得到，过热蒸汽火用、给水火用等参数均可通过实际数据计算得到。

项 目	计 算 结 果
火用效率	40.91%
燃烧火用损失	26.27%
传热火用损失	29.11%
排烟火用损失	1.14%
机械不完全燃烧火用损失	0.79%
化学不完全燃烧火用损失	1.21%
散热火用损失	0.39%
其他火用损失	0.18%

从表中可以看出，锅炉烟效率仅为 40.91%，相比其热效率相差很多。锅炉的烟损失中最大的一项是传热造成的烟损，占 29.11%，提高蒸汽参数和降低排烟温度都可减少传热烟损失；其次是燃料燃烧产生的烟损，占 26.27%，适当提高空气预热温度和控制过量空气系数都可减少燃烧不可逆损失；在传统热平衡分析中，排烟损失是热损失中最大的一项，而在烟分析中排烟损失已经很小，这说明排烟损失虽然在数量上大，但其可用能很少，但降低率还非常重要，因为降低排烟温度可以减少系统传热温差，降低传热烟损失。



广东工业大学

GUANG DONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



请批评指正！