

低温湿烟气热力特性及余热回收利用分析

王政伟 林 蒙

(常州大学石油工程学院 江苏常州 213000)

摘 要: 通过对湿烟气进行热力学分析, 确定其相对湿度、含湿量、露点和总焓值的计算式; 以燃烧天然气为例, 计算其湿烟气中水蒸气的分压力、露点温度和含湿量, 并对湿烟气的低温段冷凝换热中回收的显热和潜热进行分析计算, 结果表明: 燃气锅炉热效率可以提高 10% - 15%, 节能效益显著。

关键词: 湿烟气; 显热; 潜热; 热效率

中图分类号: X701 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2015.02.022

引 言

天然气作为一种优质、高效、清洁的燃料, 已成为目前城市工业锅炉和特殊行业的工业炉窑的主要燃料, 由于天然气的成分主要甲烷气体, 其燃烧后的烟气含有大量的水蒸气, 容积比高约 20%; 目前, 国内的燃气蒸汽锅炉和工业炉窑由于结构上的限制及各种其它因素的影响, 排烟温度一般能达到 200 °C 左右, 烟气中的部分显热和水蒸气的凝结潜热没有得到利用就排入大气, 造成了较大的浪费, 燃气锅炉的热效率约为 90%。如能在其尾部安装高效的冷凝式换热器, 将排烟温度降低至 50 °C 以下, 回收低温湿烟气中的显热和潜热, 燃气锅炉的效率将提高 10% - 15%。同时, 水蒸气在凝结过程中, 将吸收烟气中的酸性气体, 对减少污染和环境保护更加有利^[1-4]。本研究首先提出了湿烟气的定义, 对露点、相对湿度、含湿量等热力学参数进行了描述, 给出了计算公式; 其次对燃烧天然气的湿烟气进行了具体的分析计算, 得到相关参数; 最后对低温湿烟气的显热和潜热进行了详细的计算, 给出计算曲线图表, 为高效利用天然气低温湿烟气的余热及技术经济分析提供理论依据。

1 低温湿烟气的相关热力学参数

本研究中干烟气是指不含水蒸气的烟气, 其主

要由 CO₂、N₂ 和少量的 O₂ 组成, 而湿烟气是指干烟气和水蒸气的混合烟气。根据湿烟气中水蒸气的含量及所处的温度不同, 可以分为未饱和湿烟气与饱和湿烟气。当水蒸气分压力 p_v 低于对应烟温 t 的饱和压力 p_s 时, 此湿烟气为未饱和湿烟气, 当水蒸气分压力 p_v 等于烟温 t 的饱和压力 p_s 时, 此湿烟气为饱和湿烟气, 饱和湿烟气吸收水蒸气的能力已经达到极限, 若再向它加入水蒸气将凝结为水滴从中析出。当在一定的 p_v 下, 冷却未饱和湿烟气达到饱和湿烟气时, 将结出露珠时的温度, 称之为湿烟气的露点温度。

在相同的总压力 p 下, 湿烟气中水蒸气的分压力 p_v 与同一温度的饱和湿烟气中水蒸气的分压力 p_s 的比值称为相对湿度, 用 φ 表示, 即

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \quad (p_s \leq p) \quad (1)$$

φ 值介于 0 和 1 之间, φ 越小表示湿烟气离饱和湿烟气越远, 即烟气越干燥, 吸收水蒸气能力越强, 反之, φ 越大, 吸收水蒸气的能力越差。因此, φ 的大小直接反映了湿烟气的吸湿能力。

1 kg 干烟气所带有的水蒸气质量称之为含湿量, 用 d 表示, kg(水蒸气)/kg(干烟气), 即

$$d = \frac{m_v}{m_y} = \frac{n_v M_v}{n_y M_y} \quad (2)$$

式中: n_v 、 n_y — 湿烟气中水蒸汽和干烟气的摩尔数, 由分压定律可知, 理想气体混合物中的各组元摩尔数之比等于分压力之比, 且 $p_y = p - p_v$; M_v 、 M_y — 水蒸汽和干烟气的摩尔质量, $M_v = 18.016 \times 10^{-3}$ kg/mol, 而燃烧天然气的干烟气主要由 CO₂、N₂ 和少量的 O₂ 组成, 根据表 2 天然气的燃烧计算结果, 可得出干烟气的总质量 $m_y = 10.87$ kg/m³, 3 种气体的质量份额分别为 $w_{CO_2} = 0.17$, $w_{N_2} = 0.82$, $w_{O_2} = 0.01$, 则干烟气的摩尔质量:

收稿日期: 2014-04-10; 修订日期: 2014-05-05

基金项目: 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(SBY201320283)

作者简介: 王政伟(1961-), 男, 江苏常州人, 常州大学教授。

$$M_y = (44w_{\text{CO}_2} + 28w_{\text{N}_2} + 32w_{\text{O}_2}) \times 10^{-3} = 30.685 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}。$$

式(2)可以转换为:

$$d = 0.587 \frac{p_v}{p_y} = 0.587 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (3)$$

2 天然气燃烧特性

天然气的成分如表 1 所示。

表 1 天然气成分表

Tab. 1 Table of the composition of natural gas

| CH ₄ % | C ₂ H ₆ % | C ₃ H ₈ % | C ₄ H ₁₀ % | N ₂ % | Q _{net,ar} kJ/m ³ |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| 98 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 1 | 36 442 |

天然气燃烧特性计算结果如表 2 所示。

表 2 天然气燃烧特性表

Tab. 2 Table of the combustion characteristics of natural gas

| 参 数 | 结 果 |
|--|----------|
| 理论空气量 $V_k^0 / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 9.56 |
| 理论 RO ₂ 体积 $V_{\text{RO}_2} / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 1.009 |
| 理论 H ₂ O 体积 $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 2.215 8 |
| 理论氮气体积 $V_{\text{N}_2}^0 / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 7.56 |
| 过量空气系数 α | 1.05 |
| 实际 H ₂ O 体积 $V_{\text{H}_2\text{O}} / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 2.222 8 |
| 实际氮气体积 $V_{\text{N}_2} / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 7.92 |
| 过剩氧体积 $V_{\text{O}_2} / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 0.100 38 |
| 实际总体积 $V_y / \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ | 11.252 |
| H ₂ O 容积份额 $r_{\text{H}_2\text{O}}$ | 0.1975 |

根据水蒸汽的特性表,用 Origin 拟合得出水蒸汽的露点温度 t_d :

$$t_d = -8.63 + 35.58(1 - e^{-\frac{p_v}{2.19}}) + 69.04(1 - e^{-\frac{p_v}{31.08}}) \quad (4)$$

$$\gamma = \gamma_0 - 2.41t_d \quad (5)$$

式中: p_v —水蒸气分压力, kPa; γ —烟气露点温度对应的凝结潜热值, kJ/kg; γ_0 —0 °C 对应的水蒸汽凝结潜热值 2 500 kJ/kg。

根据表 2 天然气燃烧计算结果:

$$p_v = r_{\text{H}_2\text{O}} \times 101.3 = 20.01$$

根据露点温度计算式(4)可以得到湿烟气露点温度为 $t_d = 59.7$ °C; 露点温度对应的潜热 $\gamma = 2 356.03$ kJ/kg; 湿烟气对应的含湿量 $d_0 = 0.587$

$$\frac{p_v}{p - p_v} = 0.143 7 \text{ kg/kg};$$

燃烧天然气的干烟气的总质量为 10.87 kg/m³, 湿烟气中水蒸汽的总含量为:

$$m_v = d_0 m_y = 0.143 7 \times 10.87 = 1.652 \text{ kg/m}^3$$

3 湿烟气余热回收分析计算

现在投运的燃气锅炉,由于结构上的限制、能源价格较低和回收余热技术上困难,排烟温度都较高,绝大多数燃气蒸汽锅炉的排烟温度 200 °C 以上,随着天然气供需矛盾的突出和价格的不断上升,回收燃烧天然气的低温湿烟气的余热显得尤为重要,不仅要回收利用烟气的显热,更重要的是回收湿烟气中水蒸汽的潜热,也就是要使烟气温度降低到水蒸气露点以下,回收凝结放出凝结潜热。

3.1 湿烟气的显热计算

根据烟气温焓表可以计算出不同排烟温度下的烟气显热,从而得到不同温度相对排烟温度 200 °C 时的显热回收量。烟气温焓的计算是以标准状态下 1 m³ 气体燃料为基础进行计算的。实际烟气的焓值等于理论烟气温焓、过量空气焓之和,即:

$$I_y = I_y^0 + (\alpha - 1) I_k^0 \quad (6)$$

式中: I_y^0 —理论烟气体积焓, kJ/m³。

当温度为 t °C 时, I_y^0 值为:

$$I_y^0 = (V_{\text{RO}_2} \overline{C_{\text{RO}_2}} + V_{\text{N}_2}^0 \overline{C_{\text{N}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \overline{C_{\text{H}_2\text{O}}}) t = 14.85t \quad (7)$$

理论空气焓 I_k^0 为:

$$I_k^0 = V_k^0 \rho_0 \overline{c_p^k} t = 9.56 \times 1.293 \times 1.004 = 12.44 t$$

则

$$I_y = 14.85t + 12.44(\alpha - 1)t \quad (8)$$

根据选取不同的空气过剩系数和温度,得到的烟气温焓计算结果如图 1 所示。

物体在加热或冷却过程中,温度升高或降低而不改变其原有相态所需吸收或放出的热量,称为显热,以 Q 表示。而烟气的显热等于烟气起点 1 与终点 2 的焓差。

$$Q_{y1} = I_{y1} - I_{y2}$$

其中,起点焓值即为 200 °C 的烟气温焓,终点焓值即为出口烟温的烟气温焓。烟气显热计算结果绘制如图 2 所示。

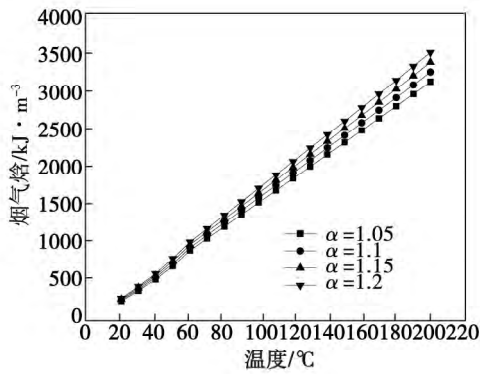


图 1 烟气焓温

Fig. 1 Temperature enthalpy diagram of the flue gases

根据图 1 可以看出,烟气温度越高,过量空气系数在合理变化范围之内,其值越高,烟气焓值越高,那么锅炉效率也越高。

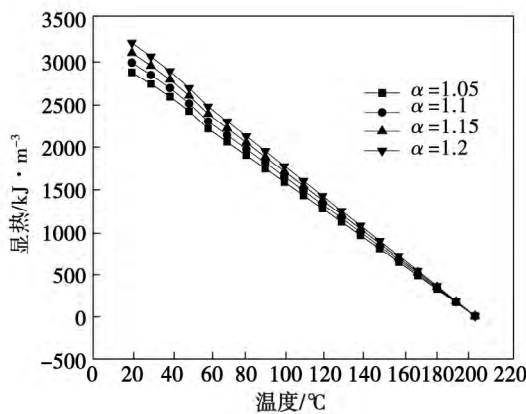


图 2 烟气显热

Fig. 2 Sensible heat of the flue gases

根据图 2 可以看出,过量空气系数在合理变化范围之内,其值越高,烟气显热越高,那么锅炉效率也越高。

3.2 湿烟气的潜热计算

根据不同温度下水蒸气饱和分压力计算出烟气中的冷凝水量(排烟温度按 200 °C),当湿烟气一直处于饱和状态,即相对湿度按 φ = 100% 计算时,冷凝水量最小,当烟气冷凝后处于不饱和状态时,冷凝量增大。那么根据湿烟气的含湿量可求出其凝结量,以及不同相对湿度下的潜热值。计算结果如图 3、图 4 所示。

根据水蒸汽热力特性表^[5],用 Origin 拟合得出

为饱和湿烟气中水蒸气分压力 p_s 与烟气温度 t 之间关系:

$$p_s = 1.91e^{\frac{t}{24.70}} - 1.88 \quad (9)$$

$$\gamma = \gamma_0 - 2.41t \quad (10)$$

那么湿烟气的冷凝水量:

$$\Delta m_v = (d_0 - d) m_y = (d_0 - 0.587 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}) m_y \quad (11)$$

在凝结过程中放出的凝结潜热值:

$$Q_{y2} = \Delta m_v (\gamma_0 - 2.41t) \quad (12)$$

式中: t —烟气排烟温度, °C; γ_0 —0 °C 对应的潜热值 2 500 kJ/kg; γ —烟气排烟温度对应的潜热值, kJ/kg; Δm_v —凝结量 kg/m^3 ; d_0 —湿烟气的初始含湿量,也是湿烟气露点温度 59.7 °C 下的总含湿量, $d_0 = 0.1473 \text{ kg}/\text{kg}$; m_y —1 m^3 天然气燃烧后产生的干烟气质量, $m_y = 10.87 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

由上述公式可以看出,凝结潜热 $Q_{y2} = f(t)$, 即凝结潜热是随排烟温度 t 变化的,温度不同,回收的凝结潜热也不一样。

图 3 是根据公式(11)得到的凝结量与烟气温度的关系式,从图中可以看出,排烟温度越低,冷凝水量越大;同时当烟气处于不饱和状态时凝结量大于饱和状态。

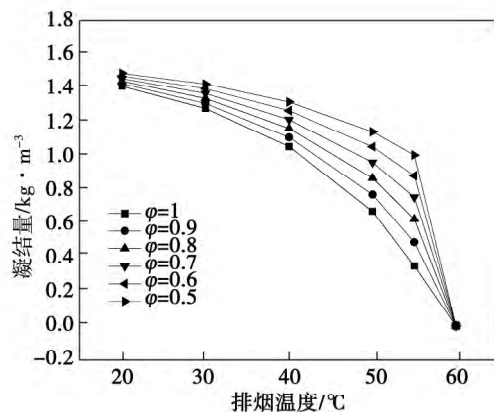


图 3 冷凝水量

Fig. 3 Condensate water flow rate

图 4 是根据式(11)和式(12)得到的凝结潜热和烟气温度之间的关系。从图中可以看出,排烟温度越低,凝结潜热越大;当烟气处于不饱和状态时凝结潜热大于饱和状态凝结潜热。

通过对烟气显热和潜热的计算,可以得出烟气中总回收量。

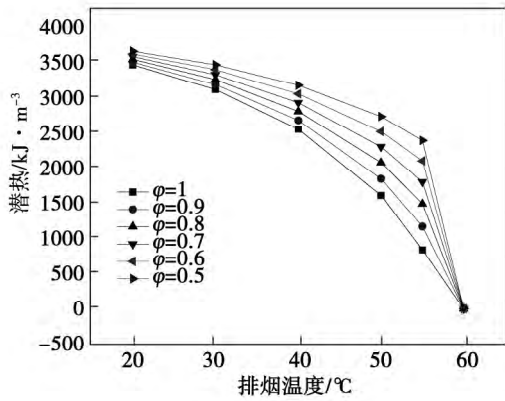


图 4 释放的潜热值

Fig. 4 Latent heat value released

根据燃气锅炉效率计算式:

$$\eta_{gl} = \frac{Q_1}{Q_{net,ar} + \alpha I_k^0} \times 100\% = \frac{(Q_{11} + Q_{12}) \Phi}{Q_{net,ar} + \alpha I_k^0} \times 100\% \quad (13)$$

式中: $Q_{net,ar}$ — 燃料的低位发热量 kJ/m^3 (不包含水蒸气凝结潜热); Q_1 — 锅炉的有效利用热 kJ/m^3 ; Q_{11} — 锅炉的有效利用热中烟气放出的显热 kJ/m^3 ; Q_{12} — 锅炉的有效利用热中烟气水蒸气放出的潜热 kJ/m^3 ; Φ — 保温系数, 一般取 0.98 - 0.99。

当锅炉的排烟温度为 170 °C, 根据上述公式计算得到的锅炉效率为 $\eta_{gl} = 90\%$, 当排烟温度降至 170 °C 以下, 锅炉效率的提高值, 计算结果如图 5 所示^[5]。

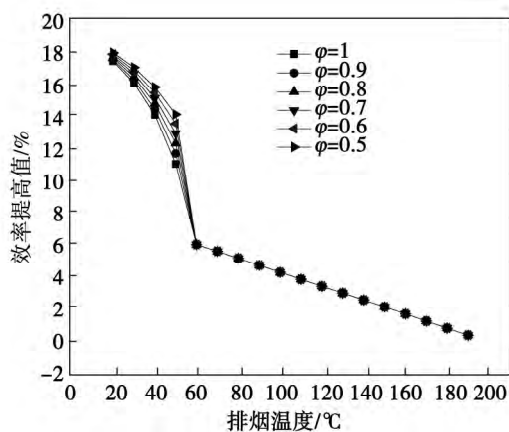


图 5 不同排烟温度下的锅炉热效率提高值

Fig. 5 Efficiency value of the boiler enhanced at various exhaust gas temperatures

由图中曲线以及前面的表格数据可以看出, 排烟温度在 60 - 200 °C 时, 烟气热能回收量只有烟气显热, 变化比较缓慢; 排烟温度在 20 - 60 °C 时, 烟气热能回收量既有烟气的显热同时又有水蒸气的凝结潜热, 变化比较大。因此, 回收烟气中水蒸气的凝结潜热比仅仅回收烟气显热的效果更为明显, 正如图表显示。当排烟温度降低至 30 °C 时, 以燃料低位发热量为基准, 根据式(13) 计算锅炉效率, 可得到热效率 > 100%。

4 节能经济效益分析:

以蒸发量 $D = 4 \text{ t/h}$ 天然气蒸汽锅炉为例, 排烟温度为 170 °C 时, 锅炉效率为 $\eta_{gl} = 90\%$, 单位时间内天然气的耗量为 $333 \text{ m}^3/\text{h}$, 锅炉运行 1 a 的燃气费为:

$$333 \times 7\,000 \times 3.65 = 852 \text{ 万元}$$

加装余热回收装置后, 锅炉最大效率可达 105%。在其他条件不变的情况下, 1 年的燃料费为: $285 \times 7\,000 \times 3.65 = 722 \text{ 万元}$, 两者相差 130 万, 由此可见, 经济效益较为明显。

5 结 论

(1) 提出了湿烟气的概念, 并对其热力学基本参数如相对湿度、露点、含湿量和总焓量给出了定义和计算式, 为低温湿烟气的余热回收利用的计算提供基础。

(2) 以燃烧天然气的湿烟气为例, 计算得到其湿烟气中水蒸气容积份额达到 20%, 露点温度为 59.7 °C, 单位天然气燃烧后烟气中的水蒸气量达到 $1.652 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

(3) 当湿烟气流过低于露点温度的换热壁面时, 将发生冷凝现象, 放出凝结潜热; 当湿烟气的排出温度接近环境温度时, 锅炉的效率理论上可以提高 15%, 节能效益显著。

(4) 水蒸气在冷凝结露的过程中, 将吸收 NO_x 等酸性气体, 降低了排烟的 NO_x 浓度, 对环境保护起到一定的作用。

参考文献:

[1] 车得福. 冷凝式锅炉及其系统 [M]. 北京: 机械工业出版社 2002.
CHE De-fu. Condensing type boilers and their systems [M]. Beijing: Mechanical Industry Press 2002.

[2] 贾力, 孙金栋, 李孝萍. 天然气锅炉烟气冷凝热能回收的研究 [J]. 节能与环保 2001 (1): 31 - 33.
IA Li, SUN Jin-dong, LI Xiao-ping. Study of the condensing heat energy recovery from flue gases in natural gas-fired boilers [J]. Energy-saving and Environmental Protection 2001 (1): 31 - 33.

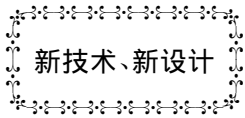
[3] 赵欣新, 查爽, 康子晋, 等. 冷凝式锅炉及工程应用 [J]. 工业锅炉 2003(4): 1 - 9.
ZHAO Xin-xin, CHA Shuang, KANG Zi-jin, et al. Condensing type boilers and their engineering applications [J]. Industrial Boilers,

2003 (4): 1 - 9.

[4] 李慧君, 王树众, 张斌, 等. 冷凝式燃气锅炉烟气余热回收可行性经济分析 [J]. 工业锅炉 2003(2): 1 - 4.
LI Hui-jun, WANG Shu-zhong, ZHANG Bin, et al. Economic analysis of the feasibility of the waste heat recovery from flue gases in condensing type gas-fired boiler [J]. Industrial Boiler 2003(2): 1 - 4.

[5] 高春阳, 刘艳华, 车得福. 天然气锅炉改造为冷凝式锅炉的经济性评价 [J]. 节能技术 2003, 21(5): 8 - 11.
GAO Chun-yang, LIU Yan-hua, CHE De-fu. Cost-effectiveness evaluation of the reconstruction of a natural gas-fired boiler into a condensing type boiler [J]. Energy-saving Technology, 2003, 21 (5): 8 - 11.

(单丽华 编辑)



全球最大的熔盐塔式项目新月沙丘电站完成建设

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.02.023

2月12日, SolarReserve 公司宣布, 其位于内华达州在建的新月沙丘光热电站已经完成建设, 开始进入试运行的调试阶段。这是全球最大的塔式熔盐电站, 装机 110 MW。该项目采用 SolarReserve 公司领先的熔盐传热储热技术, 配 10 h 储热系统, 预计商业化运行后年发电量达 50 万 MWh。作为继 Gemasolar 电站后塔式熔盐技术的一次大规模化尝试, 新月沙丘电站吸引着全球的关注目光, 该电站即将于 2015 年初并网发电, 其实际运行效果将备受关注。

(吉桂明 摘译)

Through establishing a wet-method flue gas desulfurization test platform ,experimentally studied was the catalytic oxidation of SO_2 by iron and manganese ions with the law governing the influence of such parameters as the solution temperature and O_2 concentration in a hybrid gas on the SO_2 oxidation reaction being mainly analyzed. It has been found that the catalytic oxidation by iron and manganese ions will make the SO_2 oxidation reaction speed to get a relatively big increase. The solution temperature exercises strong influence on the SO_2 oxidation reaction ,however , changes of the O_2 concentration in the hybrid gas exercise relatively weak influence on the SO_2 oxidation reaction. In the meantime ,the catalytic oxidation reaction processes of Mn^{2+} and Fe^{3+} are basically similar and when these two kinds of ion are present simultaneously ,the synergy effect between the ions will further accelerate the SO_2 oxidation reaction. **Key Words:** wet-method flue gas desulfurization , SO_2 , catalytic oxidation , iron and manganese ion

低氮改造后四角切圆燃煤粉锅炉变负荷下 NO_x 生成规律数值模拟研究 = **Study of the Numerical Simulation of the Law of NO_x Formation in a Tangential Pulverized-coal-fired Boiler at a Variable Load After a Low Nitrogen Modification** [刊 ,汉] LI De-bo ,XU Qi-sheng ,SHEN Yue-liang ,DENG Jian-hua ,LIU Ya-ming (Electric Power Science Research Institute ,Guangdong Power Grid Corporation ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510060) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(2) . -253 -261

By making use of the software Ansys Fluent 14.0 ,the authors conducted a numerical simulation of the combustion characteristics at a variable load after a low nitrogen modification to a power plant with the law governing the speed field ,temperature field and constituent field in the furnace as well as the distribution of pollutants being mainly studied. It has been found that after the low nitrogen modification ,to increase the amount of SOFA air can make the temperature distribution in the furnace to be comparatively uniform ,the formation of the tangential circles is relatively good and there emerge no flame-closing-to-wall phenomena; the temperature difference in the zone of the burners between the load of 40% and 100% is 132.9 K and the descending range is up to 7.8% ; with a decrease of the load ,the temperature of flue gases at the outlet of the furnace will gradually decline; with a drop of the load ,the NO_x concentration at the outlet of the furnace will gradually become lower. **Key Words:** tangential ,low nitrogen modification , NO_x distribution ,variable load ,numerical simulation

低温湿烟气热力特性及余热回收利用分析 = **The Thermodynamic Characteristics of Wet Flue Gases at a Low Temperature and Analysis of Their Waste Heat Recovery and Utilization** [刊 ,汉] WANG Zheng-wei ,LIN

Meng (Changzhou University ,Changzhou ,China ,Post Code: 213000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(2) . -262 -266

Through a thermodynamic analysis of wet flue gases ,determined were the formulae for calculating the relative humidity ,moisture content ,dew point temperature and total enthalpy value. In the meantime ,with natural gas serving as an example ,the component pressure of steam ,dew point temperature and moisture content of the wet flue gases were calculated and the sensible and latent heat of the wet flue gases recovered from the condensing heat exchange in the low temperature sections were analyzed and calculated. It has been found that the thermal efficiency of the gas-fired boiler can increase by over 10% to 15% ,obtaining notable energy saving benefits. **Key Words:** wet flue gas ,sensible heat ,latent heat ,thermal efficiency

一种煤质数据库的建立方法 = A Method for Establishing the Database of Coal Quality [刊 ,汉] ZHAO Ming , SAI Jun-cong ,QIU Ya-lin (Electric Power Research Institute ,Yunnan Electric Power Experiment Research Institute (Group) Co. Ltd. ,Kunming ,China ,Post Code: 650217) ,LI Peng-fei ,WANG Yang ,DING Chang-fu (College of Energy Power and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) ,LI Peng-fei ,LIANG Jun-yu (Postgraduate Work Station ,Yunnan Power Grid Corporation ,North China University of Electric Power ,Kunming ,China ,Post Code: 650217) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(2) . -267 -271

To guarantee the accuracy of a coal consumption on-line real-time monitoring system in the process of energy-saving power generation dispatching and lower the deviation of the boiler efficiency arisen from the complexity of coal quality and uncertainty of the artificial off-line input during the on-line calculation of the boiler efficiency ,the statistical and clustering calculation method and others were used to build a database of coal quality for specific zones in a power plant. It has been found that coal having an error within 600 kJ/kg between the heating value calculated by using the “unreal coal quality” thus established and that tested on the basis of the real coal quality occupies 92.4% , thus achieving a relatively good overall matching degree. In the real applications ,the heating value taken from the database established on the basis of the unreal coal quality always keeps high consistency with the heating value tested on the same day with the maximum error being controlled within 700 kJ/kg. To use the database established on the basis of the unreal coal quality to conduct an on-line calculation of the boiler efficiency can guarantee comparatively well the justice and impartiality of an on-line coal consumption monitoring system on various power plants in a region. **Key Words:** database of coal quality ,boiler efficiency ,on-line monitoring ,energy-saving power genera-