

煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率计算方法研究

叶亚兰¹, 司风琪², 徐治皋², 江文豪³

(1. 江苏海事职业技术学院 轮机工程学院 江苏 南京 211170; 2. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室 江苏 南京 210096; 3. 中冶华天工程技术有限公司 江苏 南京 210000)

摘要: 对于将煤粉与高炉煤气混烧的锅炉, 由于其特有的燃料性质以及由此带来的锅炉尾部受热面的不同设置方式, 加上入炉煤量难以准确计量的问题, 使得该类锅炉的热效率计算和修正有别于传统方法。在 GB 10184-1988《电站锅炉性能试验规程》的基础上, 结合燃料性质和锅炉尾部受热面的设置特点, 分析得到了将煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率计算和修正方法, 结果可为该类锅炉的效率测试和计算提供参考。

关键词: 高炉煤气; 煤粉; 混烧锅炉; 热效率; 修正计算; GB10184-1988

中图分类号: TK11⁺3 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.02.014

引言

近年来, 一些钢铁厂通过混烧煤粉与高炉煤气的方式, 有效地解决了高炉煤气单独燃烧较为困难的问题; 从钢铁厂的角度来看, 采用混烧锅炉能较好地利用高炉煤气, 降低高炉煤气的放散率, 且有助于实现煤气管网的平衡; 此外, 锅炉混烧煤气后, SO_2 、 NO_x 和粉尘颗粒物的排放量与传统的煤粉锅炉相比均有较大幅度的降低^[1]。因此, 煤粉与高炉煤气混烧锅炉在钢铁行业具有广阔的应用前景, 尤其是在当前资源日益紧张和环保要求越来越高的形势下, 更能凸显其经济效益和社会效益。

目前, 已有许多学者以混烧锅炉为对象展开了相关研究, 但研究范围主要集中于锅炉的燃烧特性和传热特性等方面^[1-6], 而对于锅炉热效率计算相关的研究还很少。锅炉热效率是机组性能考核的关键指标, 目前工程上对于钢铁企业自备电厂煤粉与高炉煤气混烧锅炉进行热效率测算的主要依据是 GB/T 10184-1988《电站锅炉性能试验规程》^[7], GB/T10184-1988 中提供了燃煤锅炉混烧气体燃

料时的计算方法(折算出混合燃料成分后按照传统的燃煤锅炉进行计算), 然而, 该方法可用于大多数气体燃料与煤粉的混烧, 但是对于混烧高炉煤气的情况却不适用, 这是因为传统的计算方法基于燃料含氮量较低的简化条件, 而高炉煤气的含氮量很高, 一般高达 50% - 60%, 使得即使高炉煤气的混烧比不高, 折算后的混合燃料含氮量仍然处于较高水平, 此时套用传统方法必然带来较大误差。

另外一方面, 要准确计算混烧锅炉的热效率, 必须知道两种不同燃料的配比, 入炉煤量和入炉煤气量是必不可少的已知条件。其中, 对于煤气流量, 目前其计量技术已经较为成熟; 但是对于入炉煤量, 尤其是对于配置中储式制粉系统的锅炉, 很难准确获取对应工况下的入炉煤量, 而目前大多数钢铁厂混烧锅炉配置的都是中储式制粉系统, 这就给锅炉热效率的测算带来很大困难。

此外, 随着余热综合利用技术的开展, 越来越多的煤粉与高炉煤气混烧锅炉增设了煤气加热器, 改变了传统锅炉以空气预热器为末级换热器的布置特点, 使得锅炉热效率的修正计算不能再沿用 GB10184-1988 提供的方法。

基于上述背景, 本研究结合煤粉与高炉煤气混烧锅炉的燃料特性及尾部受热面的设置特点, 在 GB10184-1988 的基础上对混烧锅炉的热效率计算模型和修正方法进行分析, 所得结果可为该类锅炉的热效率测试和计算提供参考, 具有一定的实用意义。

1 混合燃料特性求解模型

对于混烧煤粉与高炉煤气的锅炉, 首先应根据两种燃料的入炉流量配比将二者的特性数据折算为

收稿日期: 2015-01-06; 修订日期: 2015-04-21

作者简介: 叶亚兰(1986-), 女, 江苏南京人, 江苏海事职业技术学院讲师。

混合燃料的特性数据,然后采用混合燃料特性进行后续的相关计算。

1.1 混合燃料特性折算方法

混合燃料的特性数据通过入炉煤量 B_c 、入炉煤气量 B_g 、以及燃煤与高炉煤气的特性数据计算得到,计算方法如下:

$$y_i = b_{\text{coal}} x_{\text{coal } i} + b_{\text{gas}} x_{\text{gas } i} \quad (1)$$

$$b_{\text{coal}} = \frac{B_c}{B_c + B_g \rho_{\text{gas}}} \quad (2)$$

$$b_{\text{gas}} = \frac{B_g \rho_{\text{gas}}}{B_c + B_g \rho_{\text{gas}}} \quad (3)$$

式中: y_i —混合燃料的某项特性数据; $x_{\text{coal } i}$ 、 $x_{\text{gas } i}$ —分别为燃煤和高炉煤气的对应特性数据; b_{coal} 、 b_{gas} —分别为煤消耗量和高炉煤气消耗量占总燃料消耗量的份额; B_c —入炉煤量, kg/h; B_g —换算为标准状态下的入炉煤气量, m^3/h ; ρ_{gas} —标准状态下高炉煤气的密度, kg/m^3 ,按下式计算:

$$\rho_{\text{gas}} = 0.0125\varphi(\text{CO}) + 0.0009\varphi(\text{H}_2) + \sum (0.0054m + 0.00045n) \varphi(\text{C}_m\text{H}_n) + 0.0152\varphi(\text{H}_2\text{S}) + 0.0196\varphi(\text{CO}_2) + 0.0125\varphi(\text{N}_2) + 0.0143\varphi(\text{O}_2) + 0.008\varphi(\text{H}_2\text{O}) + 0.001\mu_b \quad (4)$$

式中: $\varphi(\text{CO})$ 、 $\varphi(\text{H}_2)$ 、 $\varphi(\text{CO}_2)$ 、 $\varphi(\text{N}_2)$ 、 $\varphi(\text{O}_2)$ 、 $\varphi(\text{C}_m\text{H}_n)$ 、 $\varphi(\text{H}_2\text{S})$ 、 $\varphi(\text{H}_2\text{O})$ —分别为高炉煤气中相应组分的容积含量百分率, %; μ_b —高炉煤气含灰浓度, g/m^3 。

在进行上述计算时,由于高炉煤气与煤的特性在表示方式上有差异,需预先对高炉煤气的参数进行换算。以元素分析成分为例,高炉煤气的常规成分数据需预先换算为以收到基质量含量百分率表示的元素成分,然后才能与煤的收到基元素成分进行合成;同样,灰分和水分亦是如此。具体换算方法如下:

$$(C_{\text{ar}})_{\text{gas}} = \frac{0.54}{\rho_{\text{gas}}} [\varphi(\text{CO}) + \varphi(\text{CO}_2) + \sum m\varphi(\text{C}_m\text{H}_n)] \quad (5)$$

$$(H_{\text{ar}})_{\text{gas}} = \frac{0.045}{\rho_{\text{gas}}} [2\varphi(\text{H}_2) + \sum n\varphi(\text{C}_m\text{H}_n)] \quad (6)$$

$$(O_{\text{ar}})_{\text{gas}} = \frac{0.715}{\rho_{\text{gas}}} [\varphi(\text{CO}) + 2\varphi(\text{CO}_2) + 2\varphi(\text{O}_2)] \quad (7)$$

$$(N_{\text{ar}})_{\text{gas}} = \frac{1.25}{\rho_{\text{gas}}} \varphi(\text{N}_2) \quad (8)$$

$$(S_{\text{ar}})_{\text{gas}} = \frac{1.43}{\rho_{\text{gas}}} \varphi(\text{H}_2\text{S}) \quad (9)$$

$$(A_{\text{ar}})_{\text{gas}} = \frac{0.1}{\rho_{\text{gas}}} \mu_b \quad (10)$$

$$(M_{\text{ar}})_{\text{gas}} = \frac{0.8}{\rho_{\text{gas}}} \varphi(\text{H}_2\text{O}) \quad (11)$$

式中: $(C_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 、 $(H_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 、 $(O_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 、 $(N_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 、 $(S_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 、 $(A_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 、 $(M_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ —分别为换算后的高炉煤气相应成分的质量含量百分率, %。

由于高炉煤气中 H_2S 含量非常少,几乎可以忽略,因此高炉煤气换算后的元素成分 $(S_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 可忽略不计;同样,高炉煤气的含尘浓度较低(尤其是对于目前最为常用的煤气干法除尘系统,其出口煤气含尘量只有 $2-5 \text{ mg}/\text{m}^3$),因此高炉煤气换算后的灰分 $(A_{\text{ar}})_{\text{gas}}$ 也可忽略不计。

1.2 入炉煤量与混合燃料特性联合求解模型

由上述可知,计算混合燃料特性时,入炉煤量是已知条件,然而,对于配置中储式制粉系统的锅炉,很难准确获取对应工况下的入炉煤量,这无疑会影响锅炉热效率计算的顺利进行。

事实上,入炉煤量可通过其他测量参数间接计算得到,如图1所示,结合烟气成分测量值,进行入炉煤量与混合燃料特性的联合求解,具体包括如下步骤:

(1) 假定一个初始的入炉煤量 B_c ;

(2) 根据假定的入炉煤量 B_c 、实测的入炉煤气量 B_g ,将化验分析得到的燃煤与高炉煤气的特性数据折算为混合燃料的特性数据,包括混合燃料的收到基低位发热量 $Q_{\text{ar,net}}$ 、灰分 A_{ar} 、水分 M_{ar} 、碳元素含量 C_{ar} 、氢元素含量 H_{ar} 、氧元素含量 O_{ar} 、氮元素含量 N_{ar} 、硫元素含量 S_{ar} 。

(3) 根据(2)获得的混合燃料成分和取样化验得到的炉渣含碳量 C_{lz}^{C} 、飞灰含碳量 C_{fh}^{C} 计算得到实际燃烧掉的碳元素质量含量百分率 C_{ar}^{r} ,计算方法如下:

$$C_{\text{ar}}^{\text{r}} = C_{\text{ar}} - \frac{A_{\text{ar}}}{100} \left[\frac{r_{\text{lz}} C_{\text{lz}}^{\text{C}}}{100 - C_{\text{lz}}^{\text{C}}} + \frac{r_{\text{fh}} C_{\text{fh}}^{\text{C}}}{100 - C_{\text{fh}}^{\text{C}}} \right] \quad (12)$$

式中: C_{ar}^{r} —混合燃料收到基实际燃烧掉的碳元素质量含量百分率, %; C_{ar} 、 A_{ar} —分别为混合燃料收到基碳元素、灰分的质量含量百分率, %; C_{lz}^{C} 、 C_{fh}^{C} —分别为炉渣、飞灰中的含碳量, %; r_{lz} 、 r_{fh} —分别为炉渣、飞灰中灰量占燃煤总灰量的份额, %。

(4) 根据(2)获得的混合燃料成分和(3)获得

的实际燃烧掉的碳元素质量含量百分率 C_{ar}^r 计算实际燃烧条件下的燃料特性系数 β :

$$\beta = 2.35 \frac{H_{ar} - 0.126O_{ar} + 0.038N_{ar}}{C_{ar}^r + 0.375S_{ar}} \quad (13)$$

式中: β —实际燃烧条件下的燃料特性系数; H_{ar} 、 O_{ar} 、 N_{ar} 、 S_{ar} —分别为混合燃料收到基中氢元素、氧元素、氮元素、硫元素的质量含量百分率, %。

(5) 根据干烟气中的 O_2 和 CO 含量以及 (4) 获得的燃料特性系数得到计算的干烟气中三原子气体的容积含量 $\phi'_{js}(RO_2)$:

$$\phi'_{js}(RO_2) = \frac{21 - \phi'(O_2) - (0.605 + \beta)\phi'(CO)}{1 + \beta} \quad (14)$$

式中: $\phi'_{js}(RO_2)$ —计算得到的干烟气中三原子气体容积含量百分率, %; $\phi'(O_2)$ 、 $\phi'(CO)$ —分别为

干烟气中 O_2 、 CO 的容积含量百分率, %。

(6) 将 (5) 计算得到的干烟气中三原子气体的容积含量 $\phi'_{js}(RO_2)$ 和实际测量得到的干烟气中三原子气体的容积含量 $\phi'(RO_2)$ 进行比较, 如果二者差值超过设定的误差范围, 则将 $\frac{\phi'(RO_2)}{\phi'_{js}(RO_2)}B_c$ 作为新的假定入炉煤量 B_c 返回 (1) 重新执行上述步骤, 直到 $\phi'_{js}(RO_2)$ 和 $\phi'(RO_2)$ 的差值满足设定的误差范围。

(7) 输出 B_c 作为最终的入炉煤量, 输出混合燃料收到基低位发热量 $Q_{ar,net}$ 、灰分 A_{ar} 、水分 M_{ar} 、碳元素含量 C_{ar} 和 C_{ar}^r 、氢元素含量 H_{ar} 、氧元素含量 O_{ar} 、氮元素含量 N_{ar} 、硫元素含量 S_{ar} 作为最终的混合燃料特性参数。

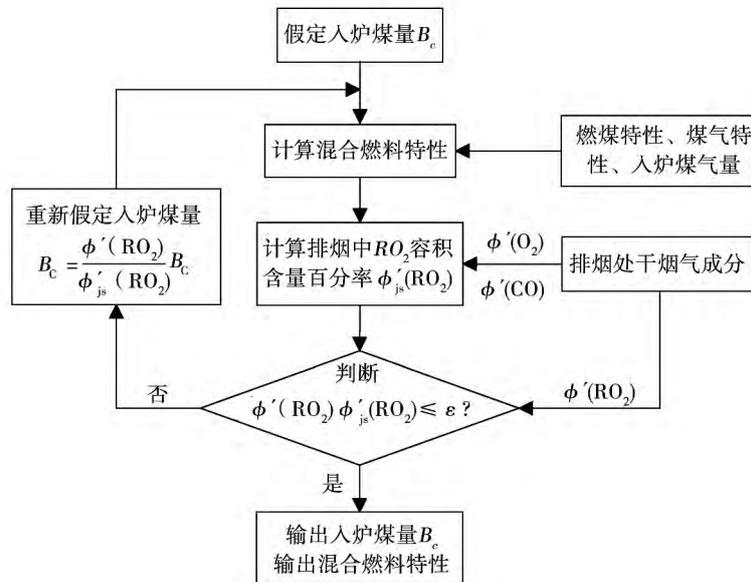


图 1 入炉煤量与混合燃料特性的联合求解流程图

Fig. 1 Procedure diagram of solving the coal quantity and mixture characteristics

2 燃烧计算模型

燃料燃烧计算是锅炉热效率计算的首要工作, 主要内容包括计算燃烧所需空气量、燃烧产生的干烟气量和水蒸气量等。

2.1 理论干空气量和理论干烟气量

理论干空气量 V_{gk}^0 按式 (15) 计算:

$$V_{gk}^0 = 0.0889(C_{ar}^r + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} -$$

$$0.0333O_{ar} \quad (15)$$

式中: V_{gk}^0 —每千克混合燃料燃烧所需的理论干空气量 m^3/kg 。

理论干烟气量 V_{gy}^0 按式 (16) 计算:

$$V_{gy}^0 = 1.866 \times \frac{C_{ar}^r + 0.375S_{ar}}{100} + 0.79V_{gk}^0 + 0.8$$

$$\frac{N_{ar}}{100} \quad (16)$$

式中: V_{gy}^0 —每千克混合燃料燃烧产生的理论干烟

气量, m^3/kg 。

2.2 过量空气系数

对于过量空气系数, 工程上一般根据按照式 (17) 进行计算:

$$\alpha_{py} = \frac{21}{21 - [\varphi(O_2) - 0.5\varphi(CO)]} \quad (17)$$

式中: α_{py} — 排烟处过量空气系数。

然而, 式 (17) 是假定燃料含 N 量很少并且理论干空气量与理论干烟气体积很接近时 (烟气中含 N 量接近 79%) 的简化公式, 对于高含 N 量的燃料并不适用。由于高炉煤气中 N 元素含量非常高 (约为 50% - 60%), 导致混合燃料的含 N 量也处于较高水平, 用式 (17) 计算 α_{py} 必然带来较大误差, 此时过量空气系数应该按照式 (18) 进行计算:

$$\alpha_{py} = \frac{21}{21 - 79 \frac{\varphi(O_2) - 0.5\varphi(CO)}{\varphi(N_2) - \frac{0.8N_{ar}}{V_{gy}}}} \quad (18)$$

式中: $\varphi(N_2)$ — 干烟气中 N_2 的容积含量百分率, %; N_{ar} — 混合燃料收到基中 N 元素的质量含量百分率, %。

2.3 实际干烟气体积

在燃烧计算中, 燃料燃烧产生的实际干烟气体积一般通过理论干烟气体积和过量空气量计算得到:

$$V_{gy} = V_{gy}^0 + (\alpha_{py} - 1)V_{gk}^0 \quad (19)$$

式中: V_{gy} — 每千克混合燃料燃烧产生的实际干烟气体积, m^3/kg 。

由式 (18) 所示的过量空气系数 α_{py} 计算公式和式 (19) 所示的实际干烟气体积 V_{gy} 计算公式可见, 高炉煤气与煤粉混烧锅炉的干烟气体积和过量空气系数需要进行联合求解, 其过程如下:

如图 2 所示, 先假定一个初始的干烟气体积 $V_{gy,jd}$, 根据式 (18) 求解得到排烟处过量空气系数 α_{py} , 然后将 α_{py} 值代入式 (19) 得到计算出的干烟气体积 $V_{gy,js}$, 并将 $V_{gy,jd}$ 和 $V_{gy,js}$ 进行比较, 如果二者差值超过设定的误差范围, 则将 $V_{gy,jd}$ 和 $V_{gy,js}$ 的平均值作为新的 $V_{gy,jd}$, 重复上述过程, 直到 $V_{gy,jd}$ 和 $V_{gy,js}$ 的差值满足设定的误差范围, 此时再将计算得到的 $V_{gy,js}$ 作为最终的干烟气体积, 将计算得到的 α_{py} 作为最终的过量空气系数。

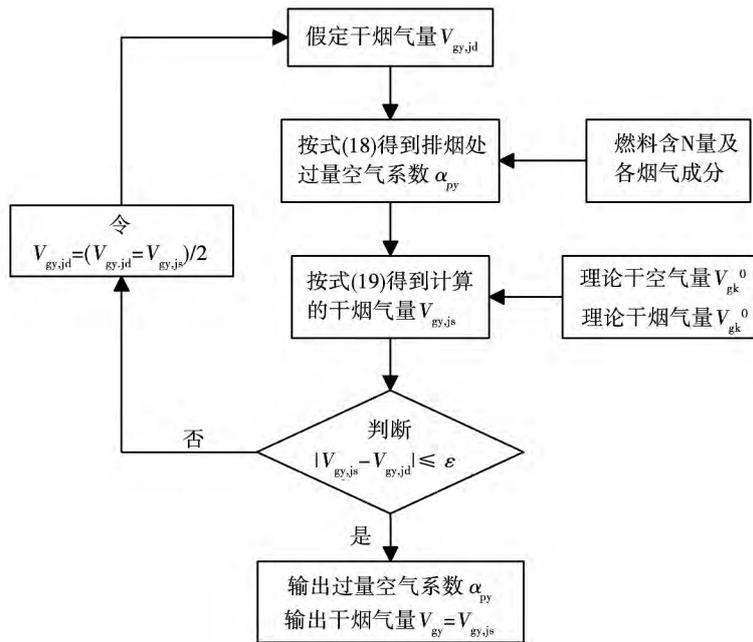


图 2 干烟气体积与过量空气系数联合求解流程图

Fig. 2 Procedure diagram of solving the dry gas volume and excess air ratio

混合燃料燃烧产生的实际干烟气体积还可通过式 (20) 进行求解:

$$V_{gy} = \frac{1.866C_{ar}^r + 0.7S_{ar}}{\varphi(O_2) + \varphi(CO)} \quad (20)$$

此时, 应先根据式 (20) 求出干烟气体积 V_{gy} , 然后

将其数值代入式(18)求解得到排烟处过量空气系数 α_{py} 。可以看出,采用此方法求解混烧锅炉的实际干烟气量更为方便,无须迭代计算,已知混合燃料成分和烟气成分数据便可求得干烟气量。

式(20)也可根据 C 元素和 S 元素的平衡追踪推导得到,采用以上两种方法计算得到的结果是一致的。

2.4 烟气中的水蒸气量

烟气中所含的水蒸气量 V_{H_2O} 可按下式求解:

$$V_{H_2O} = 1.24 \left[\frac{9H_{ar} + M_{ar}}{100} + 1.293\alpha_{py} V_{gk}^0 d_k \right] \quad (21)$$

式中: V_{H_2O} —每千克混合燃料燃烧产生的水蒸气量 m^3/kg ; M_{ar} —混合燃料收到基水分质量含量百分率,%; d_k —空气的绝对湿度 kg/kg (干空气)。

3 锅炉热效率计算模型

结合燃料燃烧计算结果,可采用热损失法进行锅炉热效率计算,其公式如下:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (22)$$

式中: η —锅炉热效率,%; q_2 —排烟热损失百分率,%; q_3 —可燃气体未完全燃烧热损失百分率,%; q_4 —固体未完全燃烧热损失百分率,%; q_5 —锅炉散热损失百分率,%; q_6 —灰渣物理热损失百分率,%。

上式中各项热损失的计算公式可参见 GB/T10184-1988《电站锅炉性能试验规程》。

4 煤粉与高炉煤气混烧锅炉热效率修正计算

4.1 煤粉与高炉煤气混烧锅炉尾部受热面设置形式

在分析煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率修正计算方法之前,先对混烧锅炉尾部受热面的设置形式进行简单介绍。如图3所示的目前最常见的两种系统,其中:

(1) 图3(a)为常规的煤粉与高炉煤气混烧锅炉,其尾部受热面的设置与传统的电站锅炉相同,即在锅炉尾部烟道中,省煤器与空气预热器沿烟气流程顺次布置,锅炉的最后一级受热面为空气预热器。

(2) 图3(b)为设置有煤气加热器的煤粉与高

炉煤气混烧锅炉,其尾部烟道增加了一级受热面—煤气加热器。由于煤气换热器系统在冷端是低温煤气,同锅炉排烟具有相当的温差,因此能够大幅降低锅炉的排烟温度,提高锅炉热效率;而低热值的高炉煤气被加热后再送入炉膛燃烧,可使炉内着火和燃烧状况得到改善,有利于解决高炉煤气混烧比例较高工况下炉膛温度较低、燃烧不稳定等问题。因此,该系统自推出以来便得到快速推广和应用。

对于这两种尾部受热面设置方式不同的混烧锅炉,其热效率的修正计算方法也不相同。

4.2 常规煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率修正

对于常规的煤粉与高炉煤气混烧锅炉,由于其尾部烟道受热面的设置与常规电站锅炉相同(即省煤器与空气预热器沿烟气流程顺次布置),因此可直接套用 GB10184-88 中的修正公式进行锅炉热效率修正。

4.3 带煤气加热器的煤粉与高炉煤气混烧锅炉热效率修正

对于带有煤气加热器的煤粉与高炉煤气混烧锅炉,由于最后一级换热器由常规的空气预热器变成了煤气加热器,因此不能完全套用 GB10184-88 中的锅炉效率修正方法,其中最主要的不同之处在于对排烟温度的修正。

4.3.1 排烟温度修正思路

当煤气加热器进口煤气温度偏离设计值时,直接影响煤气加热器的换热温差和换热量,排烟温度随之将发生明显的变化,因此需要进行煤气加热器进口煤气温度对排烟温度的修正。

在 GB10184-88 中,对常规锅炉排烟温度的修正计算主要考虑空气预热器的进口空气温度和省煤器的进口给水温度这两项因素偏离设计值所导致的排烟温度变化,且当进口空气温度和给水温度都偏离设计值时,应先对前者进行修正,然后结合该修正结果进行后者的修正。

因此,对于带煤气加热器的锅炉,对排烟温度的修正不仅要考虑空气预热器进口空气温度和给水温度的修正,还需要考虑煤气加热器进口煤气温度的修正,且当三者都偏离设计值时,应先进行煤气加热器进口煤气温度的修正,然后结合其修正结果进行空气预热器进口空气温度的修正,最后进行给水温度的修正。这不仅会增加修正计算的工作量,更为重要的是,修正项目过多很可能会降低修正结果的

有效性(因为每一项修正计算都是基于某些假定条件下的模拟计算),而另外一方面,无论是空气预热器进口空气温度变化导致的空气预热器的换热参数变化,还是给水温度变化造成的省煤器换热参数发生变化,最终都是通过煤气加热器的进口烟气温度的

的变化来影响煤气加热器的换热,并进而导致排烟温度的变化。因此,对于空气预热器和省煤器的运行条件变化对排烟温度的影响,可统一通过煤气加热器进口烟气温度的偏差来进行修正。

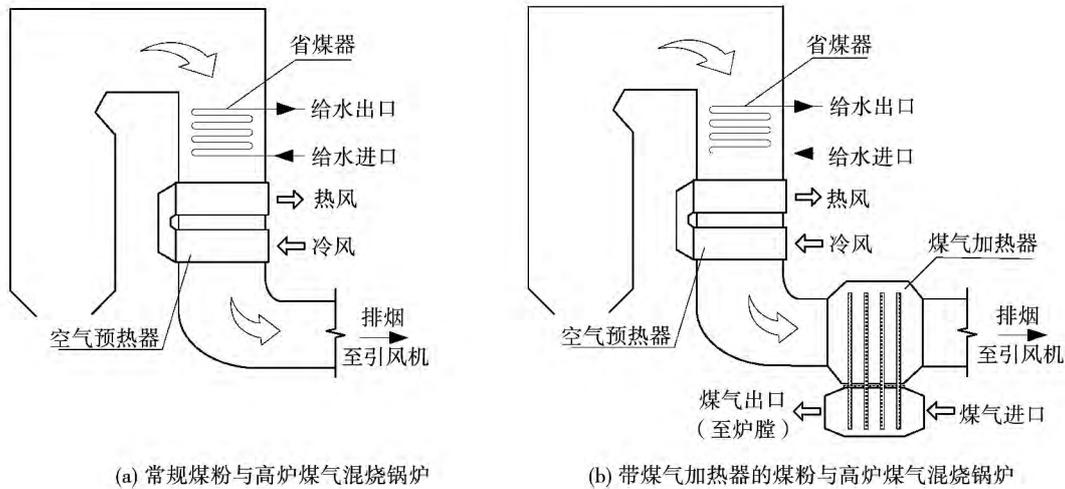


图 3 煤粉与高炉煤气混烧锅炉尾部受热面布置形式

Fig. 3 Configurations for pulverized coal and tail heating surface of BFG mixedly burned boiler

综上所述,对于带煤气加热器的锅炉,应通过煤气加热器的进口煤气温度和进口烟气温度的对排烟温度进行修正。

4.3.2 煤气加热器进口煤气温度偏差修正

当煤气加热器的进口煤气温度偏离设计值时,对排烟温度的修正公式如下:

$$\theta_{py}^b = \frac{t_{mq}^b (\theta'_{mj} - \theta_{py}) + \theta'_{mj} (\theta_{py} - t_{mq})}{\theta'_{mj} - t_{mq}} \quad (23)$$

式中: θ_{py}^b —换算到保证进口煤气温度时的排烟温度, °C; t_{mq}^b —保证的进口煤气温度, °C; t_{mq} —实测的进口煤气温度, °C; θ'_{mj} —煤气加热器进口实测烟气温度的, °C; θ_{py} —实测排烟温度, °C。

上式可根据煤气加热器的热平衡推导得出,也可通过直接将 GB10184 - 88 修正公式中空气预热器的参数换成煤气加热器的相应参数得到。

4.3.3 煤气加热器进口烟气温度的偏差修正

当煤气加热器的进口烟气温度的偏离设计值时,对排烟温度的修正公式如下:

$$\theta_{py}^b = \frac{\theta'_{mj,b} (\theta_{py} - t_{mq}) + t_{mq} (\theta'_{mj} - \theta_{py})}{\theta'_{mj,b} - t_{mq}} \quad (24)$$

式中: $\theta'_{mj,b}$ —保证的进口烟气温度的, °C。

由于高炉煤气具有易燃、易爆、有毒等特点,为了避免换热器管道发生泄漏带来的安全隐患,目前几乎所有的煤气加热器采用的都是热管式换热器(具有烟气通道和煤气通道,二者通过中间密封隔板分开,烟气和煤气分别经过各自通道,在流通的过程中利用热管完成热量的交换),这样可以很好地确保系统的安全可靠运行。因此,煤气加热器可不考虑漏风(漏气)问题,这就为排烟温度的修正计算带来很大便利,基于此条件,当煤气加热器进口烟温偏离设计值时,若假设煤气加热器烟气侧换热效率不变,则有下列等式:

$$\eta_y = \frac{(c_p)_{\theta'_{mj,b} \theta_{py}^b} (\theta'_{mj,b} - \theta_{py}^b)}{(c_p)_{t_0 \theta'_{mj,b}} (\theta'_{mj,b} - t_{mq})} = \frac{(c_p)_{\theta_{py} \theta'_{mj}} (\theta'_{mj} - \theta_{py})}{(c_p)_{t_0 \theta'_{mj}} (\theta'_{mj} - t_{mq})} \quad (25)$$

式中: η_y —煤气加热器烟气侧换热效率; $(c_p)_{\theta'_{mj,b} \theta_{py}^b}$ —烟气在 θ_{py}^b 至 $\theta'_{mj,b}$ 温度间的平均比定压热容, kJ/(Nm³ · K); $(c_p)_{t_0 \theta'_{mj,b}}$ —烟气在 t_0 至 $\theta'_{mj,b}$ 温度间的平均比定压热容, kJ/(Nm³ · K); $(c_p)_{\theta_{py} \theta'_{mj}}$ —烟气在 θ_{py} 至 θ'_{mj} 温度间的平均比定压热

容 $\text{kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot \text{K})$; $(c_p)_{t_0}^{\theta'_{mj}}$ —烟气在 t_0 至 θ'_{mj} 温度间的平均比定压热容 $\text{kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot \text{K})$ 。

假设烟气在一定温度范围内的平均比定压热容几乎相同,即有 $(c_p)_{t_0}^{\theta'_{mj,b}} \approx (c_p)_{t_0}^{\theta'_{mj}}$ 以及 $(c_p)_{\theta'_{mj,b}} \approx (c_p)_{\theta'_{mj}}$, 则式(25)可转换为:

$$\frac{\theta'_{mj,b} - \theta'_{py,b}}{\theta'_{mj,b} - t_{mq}} = \frac{\theta'_{mj} - \theta_{py}}{\theta'_{mj} - t_{mq}} \quad (26)$$

式(26)经过进一步转换即可得到式(24)所示的排烟温度修正公式,由该修正公式可知,已知实测的煤气加热器进口烟气温度、出口烟气温度(即排烟温度)、进口煤气温度,以及保证的进口烟气温度,即可求得修正后的排烟温度。

当煤气加热器的进口煤气温度和进口烟气温度均偏离设计值时,应分别按式(23)和式(24)进行排烟温度修正,并分别求得修正后排烟温度与实测排烟温度的差值,然后根据差值求得最终的修正排烟温度:

$$\theta_{py}^b = \theta_{py} + \Delta\theta_{py,1} + \Delta\theta_{py,2} \quad (27)$$

式中: $\Delta\theta_{py,1}$ —对进口煤气温度修正后的排烟温度与实测排烟温度的差值, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\theta_{py,2}$ —对进口烟气温度修正后的排烟温度与实测排烟温度的差值, $^{\circ}\text{C}$ 。

将修正后的排烟温度和保证的煤气加热器进口煤气温度代入相关热损失计算公式,结合其他常规修正,即可求得修正后的锅炉热损失,进而得到修正后的锅炉热效率。

5 结 论

(1) 结合煤粉与高炉煤气混烧锅炉的燃料特性,在 GB10184-1988 的基础上对煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率计算方法进行了分析和推导。

(2) 针对配置中储式制粉系统的锅炉很难准确计量其入炉煤量的问题,提出通过烟气成分的测量结果以及燃煤和高炉煤气的特性间接求解出入炉煤量,进而得到混合燃料特性。

(3) 常规煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率修正计算可采用 GB10184-1988 提供的方法,而对于带有煤气加热器的混烧锅炉,其热效率的修正计算则不能直接套用 GB10184-1988。结合锅炉尾部受热面的设置特点,在 GB10184-1988 的基础上对煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率修正方法进行分析,得到了适用于混烧锅炉的热效率修正计算模型,

结果可为该类锅炉的热效率测试和修正计算提供参考。

参考文献:

[1] 黄本元. 煤/煤气掺烧锅炉燃烧检测及控制研究[D]. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2010.
HUANG Ben-yuan. Diagnostics and control investigation on combined Combustion of pulverized Coal and BFG in power boiler [D]. PhD dissertation. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.

[2] 王春波, 魏建国, 盛金贵, 等. 300 MW 煤粉/高炉煤气混燃锅炉燃烧特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 14-19.
WANG Chun-bo, WEI Jian-guo, SHENG Jin-gui, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of a 300 MW blast furnace gas/pulverized coal combined combustion boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 14-19.

[3] 刘定平, 陈红艳. 低热值高炉煤气与煤粉混烧技术的探讨[J]. 锅炉技术, 2003, 34(6): 44-48.
LIU Ding-ping, CHEN Hong-yan. Study on combined combustion of low heating value blast-furnace gas and pulverized coal [J]. Boiler Technology, 2003, 34(6): 44-48.

[4] 湛志钢, 陈刚. 煤粉锅炉掺烧高炉煤气对煤粉燃尽影响的研究[J]. 动力工程, 2004, 24(2): 179-182.
ZHAN Zhi-gang, CHEN Gang. Study on the effect of blast furnace gas addition on pulverized coal combustion completeness [J]. Power Engineering, 2004, 24(2): 179-182.

[5] 杨轶, 陈刚. 煤粉和高炉煤气混烧锅炉燃烧问题的分析及改造[J]. 电站系统工程, 2003, 19(2): 36-38.
YANG Yi, CHEN Gang. Investigation and improvement of combustion system in mixedly-burned boiler of pulverized coal and blast-furnace gas [J]. Power System Engineering, 2003, 19(2): 36-38.

[6] 方立军, 武生, 胡月龙, 等. 掺烧高炉煤气对锅炉传热特性影响的研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(1): 66-70.
FANG Li-jun, WU Sheng, HU Yue-long, et al. Study on the effect of blended blast furnace gas on heat transfer characteristics [J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(1): 66-70.

[7] 中华人民共和国机械电子工业部. GB/T10184-1988, 电站锅炉性能试验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
Ministry of Machine Building and Electronics Industry of the People's Republic of China, GB/T10184-1988, Performance Test Code of Utility Boiler[S], Standards Press of China, Beijing, 1998

(刘瑶 编辑)

燃煤的一次破碎、成灰和燃烬特性实验研究 = **Experiment Study on Primary Fragmentation Ash Formation and Burnout Characteristics of Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] YANG Meng, MA Su-xia (Department of Thermal Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Post Code: 030024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2). -220 -225

The primary fragmentation, ash formation and burnout characteristics of coal have an important impact on the combustion and mass balance of circulating fluidized bed boiler. In this paper, four different coals, Inner Mongolia lignite coal, Pingshuo mixed coal, Shuozhou lean coal and Zhengzhou bituminous coal, were experimentally studied, and particle size distributions of coals before and after fragmentation and burnout characteristics were presented. The rate of particle size change after coal primary fragmentation was calculated, and an empirical correlation that agrees with the industrial prediction for coal primary fragmentation was obtained. Experimental results show that there are large differences in the primary fragmentation, ash formation and burnout characteristics for different coals. The coal with higher volatile content, lower ash content and higher fixed carbon content has higher degree of primary fragmentation. The more the mass fraction of coarse coal particles in feeding coal, the higher degree of primary fragmentation and the lower rate of particle size change. And the more volatile content in feeding coal, the higher mass fraction of fine ash particles. Among the studied four coals, Inner Mongolia lignite has highest burn rate and relatively short burnout time, approximately 30 minutes, compared to 25 minutes for Zhengzhou bituminous coal, and 45 minutes for Shuozhou lean coal and Zhengzhou bituminous coal. **Key words:** primary fragmentation, ash formation, burnout time, average particle size

煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率计算方法研究 = **Research on Thermal Efficiency Calculation Method for Boiler Mixedly Burning pulverized coal and BFG** [刊, 汉] YE Ya-lan (Jiangsu Maritime Institute, Nanjing, China, Post Code: 211170), SI Feng-qi, XU Zhi-gao (Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), JIANG Wen-hao (Huatian Engineering & Technology Corporation, MCC, Nanjing, China, Post Code: 210000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2). -226 -232

Due to the special properties of blast furnace gas (BFG) and the resulting different settings for the boiler heating-surface, along with the measurement difficulty of quantifying fuels entering furnace, the method for calculating and

correcting the thermal efficiency of boiler mixedly burning pulverized coal and BFG is different from the traditional way. Based on GB10184 - 1988 《Performance test code of utility boiler》 a calculation and correction model for the thermal efficiency of mixedly-burned boiler was put forward. It takes into account the properties of fuel and the setting characteristics of the boiler tail heating surface. The results can provide reference for the thermal efficiency test and calculation of such boiler. **Key words:** blast furnace gas(BFG) , pulverized coal , mixedly-burned boiler , thermal efficiency , correction calculation , GB10184 - 1988

几种固体吸附剂对 CO₂ 静态吸附性能的研究 = **The Static Adsorption Performance of Different Solid Adsorbents for Carbon Dioxide** [刊 汉] SUN Hang , ZHANG Li-qi , LI Xiao-shang , ZHENG Chu-guang (State Key Laboratory of coal combustion , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan , China , Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31(2) . - 233 - 238

The adsorption performance of four solid adsorbents(13X , Silica , MCM - 41 , and SBA - 15) was studied by using volumetric technique , and the influences of structure property , temperature , pressure on the adsorption capacity were analyzed. Meanwhile , the performances of different adsorbents through several regenerative cycles were investigated. The results show that the CO₂ adsorption of all these four adsorbents is physical adsorption , and the order of the adsorption capacity is: 13X > Silica > MCM - 41 > SBA - 15. The adsorption capacity is determined by the pore size of the adsorbent , and has negligible dependence on the specific surface area and the pore volume. Compared to the adsorption heat , the adsorption coefficient b plays a decisive role in the adsorption capacity; when b increases , the adsorption capacity also increases. Among the four adsorbents tested , 13X has a relatively small pore size , strong adsorption capacity and decent performance through regenerative cycles , so it is a suitable adsorbent for CO₂ adsorption. **Key words:** solid adsorbent , CO₂ static adsorption , adsorption isotherm , heat of adsorption

电厂多元优化动力配煤燃烧特性研究 = **Combustion Properties of Blended Coal for Power Plant using Multivariate Optimization** [刊 汉] CHENG Jun , WANG Xin , SI Ting-ting , ZHOU Jun-hu (Zhejiang University State Key Laboratory of Clean Energy Utilization , Hangzhou Zhejiang , China , Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31(2) . - 239 - 244

ABSTRACT: Nonlinear programming to realize the multivariate optimization technology for power coal blending was