

DOI: 10.19666/j.rlfed.202307380

GB/T 10184—2015 在高炉煤气锅炉 炉效计算中的应用分析

徐凯¹, 郑永峰², 聂雨¹, 黄伟¹, 刘军³, 郑磊¹, 孟桂祥¹,
钟平¹, 韩国庆¹, 曹寿峰¹

(1.西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215353;
2.华能苏州热电有限责任公司, 江苏 苏州 215129;
3.华北水利水电大学能源与动力工程学院, 河南 郑州 450045)

[摘要] 根据 GB/T 10184—2015, 构建了高炉煤气锅炉炉效计算模型, 分析了高炉煤气锅炉炉效计算方法。结果表明: 燃气基准的差异导致高炉煤气水分及低位发热量的计算方法不同, 并列出了 2 种燃气基准下高炉煤气水分的计算方法及低位发热量的换算方法; 提出了 3 种适用于高炉煤气锅炉的过量空气系数、实际烟气体积及烟气中 CO₂ 含量的求解方法, 并提出了适用于含煤气加热器的高炉煤气锅炉排烟温度的修正方法; GB/T 10184—2015 对部分公式的计算有待于进一步探讨, 并可作适当修改。

[关键词] GB/T 10184—2015; 高炉煤气; 锅炉效率

[引用本文格式] 徐凯, 郑永峰, 聂雨, 等. GB/T 10184—2015 在高炉煤气锅炉炉效计算中的应用分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 95-102. XU Kai, ZHENG Yongfeng, NIE Yu, et al. Application analysis of GB/T 10184-2015 standard in boiler efficiency calculation of blast furnace gas boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 95-102.

Application analysis of GB/T 10184—2015 standard in boiler efficiency calculation of blast furnace gas boiler

XU Kai¹, ZHENG Yongfeng², NIE Yu¹, HUANG Wei¹, LIU Jun³, ZHENG Lei¹, MENG Guixiang¹,
ZHONG Ping¹, HAN Guoqing¹, CAO Shoufeng¹

(1. Suzhou Branch of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215153, China;
2. Huaneng Suzhou Cogeneration Co., Ltd., Suzhou 215129, China;

3. College of Energy and Power Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: According to GB/T10184—2015, the calculation model of blast furnace gas boiler efficiency is constructed, and the calculation method of blast furnace gas boiler efficiency is analyzed. The results show that the calculation methods of gas moisture content and low-level calorific value are different due to the difference of gas benchmarks. Three methods for solving the excess air coefficient, actual flue gas volume and CO₂ content in the flue gas are proposed for blast furnace gas boilers, and a correction method for exhaust gas temperature of blast furnace gas boilers with gas heaters is proposed; The calculation of some formulas in the GB/T10184—2015 needs to be further discussed, and appropriate modifications can be made.

Key words: GB/T 10184—2015; blast furnace gas; boiler efficiency

近年来, 随着全烧高炉煤气燃烧技术的发展, 高炉煤气锅炉参数及容量逐渐提高^[1-2], 目前已有超临界高炉煤气发电机组成功投产运行。锅炉效率是衡量高炉煤气锅炉运行经济性的重要指标^[3-7], 目前

国内针对高炉煤气锅炉炉效的测试及计算一般依据《电站锅炉性能试验规程》(GB/T 10184—2015)^[8]进行, 该标准提供了锅炉燃用气体燃料时的计算公式, 但部分公式不适用于计算含氮量高且设置有煤

修回日期: 2023-07-10

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ22-HF18)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-HF18)

第一作者简介: 徐凯 (1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电站锅炉性能测试及优化调整, xukai@tpri.com.cn。

气加热器（煤加）的煤气锅炉的锅炉效率。

目前，已有学者利用 GB 10184—1988^[9]对高炉煤气锅炉及煤/气混烧锅炉进行炉效计算相关的研究^[1,10-14]，但尚无文献利用最新标准 GB/T 10184—2015 对高炉煤气锅炉进行炉效计算相关的应用分析。本文依据 GB/T 10184—2015，结合高炉煤气锅炉的高含氮量燃料特性及煤加布置特点，对高炉煤气锅炉炉效计算模型及修正方法进行分析，并提出 GB/T 10184—2015 在高炉煤气锅炉炉效计算中存在的问题。

1 高炉煤气锅炉炉效计算边界及数据来源

1.1 炉效计算边界

目前，高炉煤气锅炉尾部受热面常见布置方式有 2 种：第 1 种为常规的高炉煤气锅炉，锅炉最后一级受热面为空气预热器（空预器）；第 2 种为设置有煤加的高炉煤气锅炉，锅炉最后一级受热面为煤加。高炉煤气锅炉炉效计算边界示意如图 1 所示。GB/T 10184—2015 提供了第 1 种常规高炉煤气锅炉的边界设定（图 1 中边界 1）；针对第 2 种高炉煤气锅炉，由于高炉煤气在煤加中吸收空预器出口尾部烟气热量升温后，继续回到炉膛内部，因此煤加与空预器类似，锅炉烟气侧的系统边界应设定在煤加出口处，炉效计算边界如图 1 中边界 2 所示。

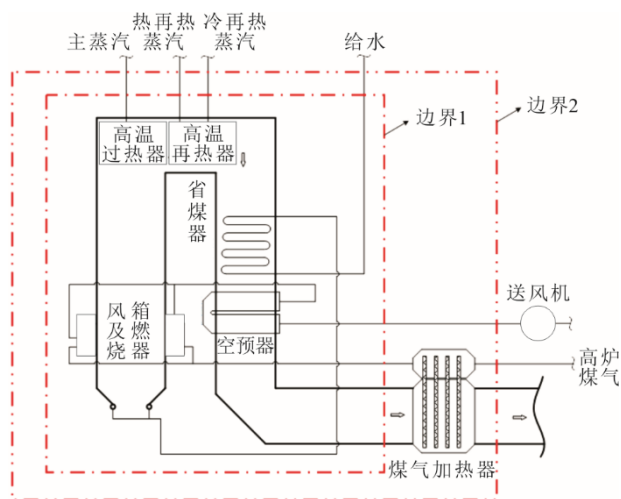


图 1 高炉煤气锅炉炉效计算边界示意

Fig.1 Boundary diagram of boiler efficiency calculation for BFG boiler

1.2 炉效计算数据来源

数据来源是炉效计算过程中重要的一部分，表 1 列出了高炉煤气锅炉炉效计算中所需要的部分

重要参数，并给出了参数的来源方式。

表 1 高炉煤气锅炉炉效计算所需参数
Tab.1 Data required for efficiency calculation of BFG boiler

项目	获取方式
煤气压力/kPa	测试
煤气温度/℃	测试
湿煤气中 φ_{N_2} 、 φ_{H_2} 、 φ_{CO_2} 、 φ_{CO} 、 φ_{CH_4} 、 φ_{O_2} /%	实验室化验
湿煤气中 φ_{H_2O} /%	计算
高炉煤气 Q_{net} /(kJ·m ⁻³)	计算
边界进口风温/℃	测试
边界处排烟温度/℃	测试
边界处排烟中 φ_{O_2} /%	测试
边界处排烟中 φ_{CO} /%	测试
边界处排烟中 φ_{CO_2} /%	计算/测试
过量空气系数	计算
实际生成干烟量/(m ³ ·m ⁻³)	计算

2 高炉煤气锅炉炉效计算模型

2.1 高炉煤气锅炉炉效计算

在高炉煤气锅炉炉效计算中，根据 GB/T 10184—2015，基准温度设定为 25 ℃，主要计算燃料效率。锅炉炉效可按下式计算：

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_{oth} - q_{ex}) \quad (1)$$

式中： η 为锅炉效率（燃料效率）； q_2 为排烟热损失，%； q_3 为气体未完全燃烧热损失，%； q_4 为固体未完全燃烧热损失，%； q_5 为锅炉散热损失，%； q_6 为灰、渣物理显热损失，%； q_{oth} 为其他热损失，可取约定值或经验值，%； q_{ex} 为外来热量与气体燃料低位发热量的百分比，%。高炉煤气锅炉中无飞灰及炉渣产生，其固体未完全燃烧热损失 q_4 和灰、渣物理显热损失 q_6 均为 0。

2.2 燃气基准

在工程上进行燃气燃烧计算时，习惯上有 2 种燃气基准：1) 以 1 m³（标准状态，下同）的湿燃气为燃气基准；2) 以 1 m³ 的干燃气和含湿度 h_g (kg/m³) 水蒸气组成的湿燃气为燃气基准^[15]。采用第 2 种燃气基准的优点是在计算中所用的干燃气成分不随含湿量的变化而变化。

对于第 1 种燃气基准，高炉煤气成分可用下式表示：

$$\begin{aligned} \varphi_{N_{2,g}} + \varphi_{H_{2,g}} + \varphi_{CO_{2,g}} + \varphi_{CO,g} + \varphi_{C_m H_n,g} + \\ \varphi_{O_{2,g}} + \varphi_{H_2O,g} = 100 \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $\varphi_{N_{2,g}}$ 、 $\varphi_{H_{2,g}}$ 、 $\varphi_{CO_{2,g}}$ 、 $\varphi_{CO,g}$ 、 $\varphi_{C_m H_n,g}$ 、 $\varphi_{O_{2,g}}$ 、 $\varphi_{H_2O,g}$ 分别为湿煤气中各组分的体积分数，%（高炉煤气中 H₂S 含量近似为 0，后续不再讨论此项）。

对于第 2 种燃气基准, 高炉煤气成分可用下式表示:

$$\begin{aligned} & \varphi_{N_2,g,d} + \varphi_{H_2,g,d} + \varphi_{CO_2,g,d} + \varphi_{CO,g,d} + \\ & \varphi_{C_mH_n,g,d} + \varphi_{O_2,g,d} = 100 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\varphi_{N_2,g,d}$ 、 $\varphi_{H_2,g,d}$ 、 $\varphi_{CO_2,g,d}$ 、 $\varphi_{CO,g,d}$ 、 $\varphi_{C_mH_n,g,d}$ 、 $\varphi_{O_2,g,d}$ 分别为干煤气中各组分的体积分数, %。

在 GB/T 10184—2015 中, 每标准立方米燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积 $V_{wv,fg,lv}$ 为:

$$V_{wv,fg,lv} = \frac{1}{100} \left(\varphi_{H_2,g} + \frac{n}{2} \varphi_{C_mH_n,g} \right) + \frac{h_g}{0.804} + \frac{1.293\alpha_{cr} V_{a,d,th,g} h_{a,ab}}{0.804} \quad (4)$$

式中: $V_{wv,fg,lv}$ 为每标准立方米燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积, m^3/m^3 ; h_g 为气体燃料的湿度 (含湿量), kg/m^3 ; α_{cr} 为修正的过量空气系数; $V_{a,d,th,g}$ 为气体燃料的理论干空气量, m^3/m^3 ; $h_{a,ab}$ 为空气的绝对湿度, kg/kg 干空气。

由上式可知 GB/T 10184—2015 使用了第 2 种燃气基准。因式中 h_g 定义为气体燃料的湿度, 即每标准立方米干气体燃料中含水蒸气的千克数。2 种燃气基准的差异导致高炉煤气水分体积分数/含湿量及低位发热量的计算方法不同。

2.3 高炉煤气燃料中水分体积分数/含湿量计算

高炉煤气化验时需要分析煤气中各种气体组分的体积分数, 通常根据 GB/T 10410 和 GB/T 13610 进行化验分析, 但是上述 2 种标准只给出了 N_2 、 H_2 、 CO_2 、 CO 、 C_mH_n 、 O_2 等成分的分析方法, 且上述 2 个标准及 GB/T 10184—2015 均未提供气体燃料中的水分化验或计算方法。进入高炉煤气锅炉边界的高炉煤气通常含有饱和水蒸气, 高炉煤气中的水分计算需要锅炉机组热平衡系统边界处气体燃料的压力、温度及大气压力 3 个参数。

对第 1 种燃气基准, 高炉煤气燃料中水分体积分数可按下式计算:

$$\varphi_{H_2O,g} = \frac{p_{H_2O}}{p_g} \times 100 \quad (5)$$

式中: $\varphi_{H_2O,g}$ 为第 1 种燃气基准下高炉煤气中的水分体积分数, %; p_{H_2O} 为高炉煤气中水蒸气分压力, kPa , 可根据高炉煤气温度计算得到; p_g 为高炉煤气绝对压力, kPa , 可根据高炉煤气压力和大气压力计算得到。

对于第 2 种燃气基准, 高炉煤气燃料的含湿量 h_g 可按下式计算:

$$h_g = \frac{p_{H_2O}}{p_g - p_{H_2O}} \times 0.804 \quad (6)$$

2.4 高炉煤气低位发热量计算及换算

高炉煤气低位发热量需要根据第 1 种燃气基准下高炉煤气中的气体组分体积分数计算得出。高炉煤气化验时, 通常仅得到第 2 种燃气基准下的气体组分体积分数, 即干燥基下的各气体组分体积分数。2 种燃气基准下的高炉煤气低位热值换算关系可按下式计算:

$$Q_{net,g} = Q_{net,g,d} \times \frac{0.804}{0.804 + h_g} = Q_{net,g,d} \times \frac{100 - \varphi_{H_2O,g}}{100} \quad (7)$$

式中: $Q_{net,g}$ 为第 1 种燃气基准 (即湿燃气) 下的高炉煤气低位发热量, kJ/m^3 ; $Q_{net,g,d}$ 为第 2 种燃气基准 (即干燃气) 下的高炉煤气低位发热量, kJ/m^3 。在高炉煤气锅炉炉效计算中, 应使用第 1 种燃气基准下的高炉煤气低位发热量。若使用第 2 种燃气基准下的高炉煤气低位发热量计算炉效, 由于湿煤气中含有一定量的饱和水蒸气, 根据式(7)可知, 第 2 种燃气基准下的高炉煤气低位发热量高于第 1 种燃气基准下的高炉煤气低位发热量, 则计算得到的炉效会偏高于实际炉效。

2.5 过量空气系数、实际烟气体积及干烟气中 CO_2 体积分数计算

2.5.1 过量空气系数

在 GB/T 10184—2015 中, 过量空气系数计算公式为:

$$\alpha = \frac{21\varphi_{N_2,fg,d}}{21\varphi_{N_2,fg,d} - 79\varphi_{O_2,fg,d}} \approx \frac{21}{21\varphi_{O_2,fg,d} - 0.5\varphi_{CO,fg,d}} \quad (8)$$

式中: α 为过量空气系数; $\varphi_{N_2,fg,d}$ 、 $\varphi_{O_2,fg,d}$ 、 $\varphi_{CO,fg,d}$ 分别为系统边界处干烟气中 N_2 、 O_2 、 CO 的体积分数, %。根据燃气燃烧原理推导, 可得到过量空气系数的完整计算公式为:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \times \frac{\varphi_{O_2,fg,d} - 0.5\varphi_{CO,fg,d}}{100 - (\varphi_{CO_2,fg,d} + \varphi_{O_2,fg,d} + \varphi_{CO,fg,d}) - \frac{\varphi_{N_2,g}}{V_{fg,d,lv}}}} = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \times \frac{\varphi_{O_2,fg,d} - 0.5\varphi_{CO,fg,d}}{\varphi_{N_2,fg,d} - \frac{\varphi_{N_2,g}}{V_{fg,d,lv}}}} \quad (9)$$

式中: $\varphi_{CO_2,fg,d}$ 为系统边界处干烟气中 CO_2 的体积分数, %; $V_{fg,d,lv}$ 为系统边界处干烟气体积, m^3/m^3 。

由式(8)、式(9)可见,式(8)是假定气体燃料中 N_2 分数 $\varphi_{N_2,g}$ 近乎为 0 且干烟气中 N_2 体积分数 $\varphi_{N_2,fg,d}$ 接近 79% 时的简化公式。因此,对于 N_2 体积分数高达 50%~60% 的高炉煤气锅炉而言,式(8)明显不适用,过量空气系数 α 需由式(9)确定。

2.5.2 实际烟气体积

在 GB/T 10184—2015 中,系统边界处干烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 计算公式为:

$$V_{fg,d,lv} = V_{fg,d,th,g} + (\alpha - 1)V_{a,d,th,g} \quad (10)$$

式中: $V_{fg,d,th,g}$ 为理论干烟气体积, m^3/m^3 ; $V_{a,d,th,g}$ 为理论干空气量, m^3/m^3 。

由式(9)和式(10)可见,系统边界处干烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 求解的前提是已知过量空气系数 α , 但干烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 和过量空气系数 α 互为未知数。

2.5.3 干烟气中 CO_2 体积分数的计算方法

锅炉机组热平衡系统边界处干烟气中 CO_2 体积分数可直接测量。实际炉效测试中存在烟气分析仪无 CO_2 测量模块或 CO_2 测量模块精度低的情况,系统边界处干烟气中 CO_2 体积分数也可通过计算方法得到。GB/T 10184—2015 提供了干烟气中 CO_2 体积分数的计算方法为:

$$\varphi_{CO_2,fg,d} = \frac{100V_{CO_2,c,b}}{V_{fg,d,lv}} - \varphi_{CO_2,fg,d} \quad (11)$$

$$V_{CO_2,c,b} = \frac{\varphi_{CO_2,g} + \varphi_{CO,g} + \sum m\varphi_{C_mH_n,g}}{100} \quad (12)$$

式中: $V_{CO_2,c,b}$ 为每立方米气体燃料实际烧掉的碳计算的 CO_2 体积, m^3/m^3 。

由式(11)可见,干烟气中 CO_2 体积分数 $\varphi_{CO_2,fg,d}$ 的求解需提前确定炉机组热平衡系统边界处干烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 的数值。

综合来看,GB/T 10184—2015 中过量空气系数 α 、系统边界处干烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 及干烟气中 CO_2 体积分数 $\varphi_{CO_2,fg,d}$ 的求解计算不完全适用于高炉煤气锅炉的炉效计算,需通过其他方法进行计算。

2.5.4 过量空气系数、实际烟气体积及烟气中 CO_2 体积分数联合求解

1) 方法 1 参考文献[11],对式(9)、式(10)和式(11)进行联合求解,首先假定一个初始的实际烟气体积,依次根据式(11)和式(9)分别得到一个假定的干烟气中 CO_2 体积分数和一个假定的过量空气系数,再将此二值代入式(10)得到计算出的实际烟气体积,将初始的实际烟气体积与计算出的实际烟气体积进

行比较,如果二者差值大于设定的误差范围,则重新设定一个新的初始实际烟气体积,直至初始的实际烟气体积与计算出的实际烟气体积差值小于设定的误差范围,即求解得到过量空气系数 α 、实际烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 和干烟气中 CO_2 体积分数 $\varphi_{CO_2,fg,d}$ 。此方法缺点在于过量空气系数 α 、实际烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 和干烟气中 CO_2 体积分数 $\varphi_{CO_2,fg,d}$ 3 项必须经过迭代计算才能同时计算得出,增加了求解难度。

2) 方法 2 通过燃气燃烧原理推导,联合下述方程组依次求解干烟气中 CO_2 体积分数 $\varphi_{CO_2,fg,d}$ 、干烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 和过量空气系数 α ,具体计算方法为:

$$V_{N_2,fg,d,th,g} = \frac{\varphi_{N_2,g}}{100} + 0.79V_{a,d,th,g} \quad (13)$$

$$V_{CO_2,c,b} = \frac{\varphi_{CO_2,g} + \varphi_{CO,g} + \sum m\varphi_{C_mH_n,g}}{100} \quad (14)$$

$$\varphi_{CO_2,fg,d} = \frac{\left(100V_{CO_2,c,b} - (V_{N_2,fg,d,th,g} - \frac{18.5}{21}V_{CO_2,c,b}) \cdot \varphi_{CO_2,fg,d} - \frac{100\varphi_{O_2,fg,d} \cdot V_{CO_2,c,b}}{21} \right)}{V_{N_2,fg,d,th,g} + V_{CO_2,c,b}} \quad (15)$$

$$V_{fg,d,lv} = \frac{21V_{N_2,fg,d,th,g}}{21 - 0.21\varphi_{CO_2,fg,d} - \varphi_{O_2,fg,d} - 0.185\varphi_{CO,fg,d}} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \times \frac{\varphi_{O_2,fg,d} - 0.5\varphi_{CO,fg,d}}{100 - (\varphi_{CO_2,fg,d} + \varphi_{O_2,fg,d} + \varphi_{CO,fg,d})} - \frac{\varphi_{N_2,g}}{V_{fg,d,lv}}} \quad (17)$$

式中: $V_{N_2,fg,d,th,g}$ 为理论干烟气体积 $V_{fg,d,th,g}$ 中的理论 N_2 量, m^3/m^3 ; $V_{a,d,th,g}$ 为理论干空气量, m^3/m^3 。

3) 方法 3 通过燃气燃烧原理推导,首先通过燃料特性系数 β 和系统边界处干烟气中 CO 体积分数和 O_2 体积分数求解得出干烟气中 CO_2 体积分数 $\varphi_{CO_2,fg,d}$,再依次根据式(15)和式(9)得出干烟气体积 $V_{fg,d,lv}$ 和过量空气系数 α ,或也可通过下列方程组得出,具体计算方法为:

$$\beta = \frac{\left(0.395(\varphi_{H_2,g} + \varphi_{CO,g}) + 0.79 \sum (m + \frac{n}{4})\varphi_{C_mH_n,g} - 0.79\varphi_{O_2,g} + 0.21\varphi_{N_2,g} \right)}{\varphi_{CO,g} + \varphi_{CO_2,g} + \sum m\varphi_{C_mH_n,g}} - 0.79 \quad (18)$$

$$\varphi_{CO_2,fg,d} = \frac{21 - \varphi_{CO,fg,d}(0.605 + \beta) - \varphi_{O_2,fg,d}}{1 + \beta} \quad (19)$$

$$V_{\text{fg,d,lv}} = \frac{(1 + \beta)(\varphi_{\text{CO}_2\text{g}} + \varphi_{\text{CO}_2\text{g}} + \sum m\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n\text{g}})}{21 - \varphi_{\text{O}_2\text{,fg,d}} + 0.395\varphi_{\text{CO,fg,d}}} \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \times \frac{\varphi_{\text{O}_2\text{,fg,d}} - 0.5\varphi_{\text{CO,fg,d}}}{100 - (\varphi_{\text{CO}_2\text{,fg,d}} + \varphi_{\text{O}_2\text{,fg,d}} + \varphi_{\text{CO,fg,d}})} - \frac{\varphi_{\text{N}_2\text{,g}}}{V_{\text{fg,d,lv}}}} \quad (21)$$

方法 2 和方法 3 计算方法相对简单, 可作为 GB/T 10184—2015 中高炉煤气锅炉求解干烟气中 CO_2 体积分数 $\varphi_{\text{CO}_2\text{,fg,d}}$ 、系统边界处于烟气体积 $V_{\text{fg,d,lv}}$ 和过量空气系数 α 的补充完善说明。

2.6 排烟温度修正思路

对于常规未设置煤加的高炉煤气锅炉, 其炉效计算边界与 GB/T 10184—2015 中典型煤气锅炉炉效计算边界相同, 仅考虑空预器进口风温及给水温度 2 个参数偏离设计值导致的排烟温度修正即可。通过对 GB/T 10184—2015 中排烟温度的修正公式进行推导可以得出, 排烟温度修正的思路是实际边界参数与设计边界参数下空预器烟气侧效率和省煤器(下级)烟气侧效率不变。空预器进口风温偏离设计值导致的排烟温度修正利用的是空预器的烟气侧效率不变; 给水温度偏离设计值导致的排烟温度修正首先利用的是省煤器(下级)烟气侧效率不变, 得到按设计给水温度修正后的省煤器出口烟温(空预器入口烟温), 再利用空预器烟气侧效率不

$$t_{\text{fg,GH,lv,cr,a}} = t_{\text{fg,GH,lv,m}} + \frac{(t_{\text{fg,AH,en,m}} - t_{\text{fg,GH,en,m}})(t_{\text{fg,GH,lv,m}} - t_{\text{gh,GH,en,m}})(t_{\text{a,AH,en,d}} - t_{\text{a,AH,en,m}})}{(t_{\text{fg,AH,en,m}} - t_{\text{a,AH,en,m}})(t_{\text{fg,GH,en,m}} - t_{\text{gh,GH,en,m}})} \quad (23)$$

式中: $t_{\text{fg,GH,lv,cr,a}}$ 为按空预器进口风温设计值修正后的排烟温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{fg,AH,en,m}}$ 为空预器进口烟气温度实测值, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{a,AH,en,d}}$ 为空预器进口风温设计值, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{a,AH,en,m}}$ 为空预器进口风温实测值, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$t_{\text{fg,GH,lv,cr,fw}} = \frac{\left((t_{\text{fg,GH,lv,m}} - t_{\text{gh,GH,en,m}})[t_{\text{fg,GH,en,m}}(t_{\text{fg,ECO,en,m}} - t_{\text{fw,m}})(t_{\text{fg,AH,en,m}} - t_{\text{a,AH,en,m}}) + (t_{\text{fg,ECO,en,m}} - t_{\text{fg,AH,en,m}})(t_{\text{fg,GH,en,m}} - t_{\text{a,AH,en,m}})(t_{\text{fw,d}} - t_{\text{fw,m}})] + t_{\text{gh,GH,en,m}}(t_{\text{fg,GH,en,m}} - t_{\text{fg,GH,lv,m}})(t_{\text{fg,ECO,en,m}} - t_{\text{fw,m}})(t_{\text{fg,AH,en,m}} - t_{\text{a,AH,en,m}}) \right)}{(t_{\text{fg,GH,en,m}} - t_{\text{gh,GH,en,m}})(t_{\text{fg,ECO,en,m}} - t_{\text{fw,m}})(t_{\text{fg,AH,en,m}} - t_{\text{a,AH,en,m}})} \quad (24)$$

式中: $t_{\text{fg,GH,lv,cr,fw}}$ 为按给水温度设计值修正后的排烟温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{fg,ECO,en,m}}$ 为省煤器(下级)进口烟温实测值, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{fw,d}}$ 为给水温度设计值, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{fw,m}}$ 为给水温度实测值, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.6.4 最终修正后的煤加出口排烟温度

结合上述 3 项对排烟温度的修正, 修正后的煤

变, 得到设计给水温度修正后的排烟温度。

对于含煤加的高炉煤气锅炉, 从炉效计算边界考虑, 存在煤加进口煤气温度、空预器进口风温及给水温度 3 个参数偏离设计值。在煤加出口排烟温度修正思路, 需要利用实际边界参数与设计边界参数下煤加烟气侧效率不变、空预器烟气侧效率不变及省煤器(下级)烟气侧效率不变推导得出修正后的煤加出口排烟温度。

2.6.1 煤加进口煤气温度偏离设计值修正后的排烟温度

利用煤加烟气侧效率不变, 可推导得出按煤加进口煤气温度设计值修正后的排烟温度为:

$$t_{\text{fg,GH,lv,cr,gh}} = \frac{\left(t_{\text{gh,GH,en,d}}(t_{\text{fg,GH,en,m}} - t_{\text{fg,GH,lv,m}}) + t_{\text{fg,GH,en,m}}(t_{\text{fg,GH,lv,m}} - t_{\text{gh,GH,en,m}}) \right)}{t_{\text{fg,GH,en,m}} - t_{\text{gh,GH,en,m}}} \quad (22)$$

式中: $t_{\text{fg,GH,lv,cr,gh}}$ 为按煤加进口煤气温度设计值修正后的排烟温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{gh,GH,en,d}}$ 为煤加进口煤气温度设计值, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{gh,GH,en,m}}$ 为煤加进口煤气温度实测值, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{fg,GH,en,m}}$ 为煤加进口烟温实测值, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{fg,GH,lv,m}}$ 为煤加出口烟温(煤加出口排烟温度)实测值, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.6.2 空预器进口风温偏离设计值修正后的排烟温度

依次利用空预器烟气侧效率和煤加烟气侧效率不变, 可推导得出按空预器进口风温设计值修正后的排烟温度为:

2.6.3 给水温度偏离设计值修正后的排烟温度

依次利用省煤器(下级)烟气侧效率、空预器烟气侧效率和煤加烟气侧效率不变, 可推导得出按给水温度设计值修正后的排烟温度为:

加出口排烟温度用于修正后的高炉煤气锅炉炉效计算, 最终修正后的煤加出口排烟温度为:

$$t_{\text{fg,GH,lv,cr}} = t_{\text{fg,GH,lv,cr,gh}} + t_{\text{fg,GH,lv,cr,a}} + t_{\text{fg,GH,lv,cr,fw}} - 2t_{\text{fg,GH,lv,m}} \quad (25)$$

式中: $t_{\text{fg,GH,lv,cr}}$ 为最终修正后的煤加出口排烟温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3 GB/T 10184—2015 在高炉煤气锅炉炉效计算中存在的问题

3.1 进入系统边界的干空气所携带的热量

针对高炉煤气锅炉,仅存在送风机冷风一种风源,GB/T 10184—2015 中进入系统边界的干空气所携带的热量计算公式为:

$$Q_{a,d} = \frac{q_{m,a}}{q_{m,f}} \left(\frac{c_{p,a} t_a}{\rho_a} - \frac{c_{p,a,ref} t_{re}}{\rho_{a,ref}} \right) \quad (26)$$

式中: $Q_{a,d}$ 为进入系统边界的干空气所携带的热量, kJ/kg; $q_{m,a}$ 、 $q_{m,f}$ 分别为进入系统边界的冷风质量流量和燃料质量流量, kg/h; $c_{p,a}$ 、 $c_{p,a,ref}$ 分别为进入系统边界的冷风定压比热容和基准温度下空气定压比热容, kJ/(m³·K); ρ_a 、 $\rho_{a,ref}$ 分别为进入系统边界的冷风密度和基准温度下空气密度, kg/m³; t_a 、 t_{re} 分别为进入系统边界的冷风温度和基准温度, °C。

对于高炉煤气锅炉,炉效计算用各项能量单位为 kJ/m³,故上式不适用于高炉煤气锅炉,应修改为:

$$Q_{a,d} = \frac{q_{m,a}}{q_{v,f}} \left(\frac{c_{p,a} t_a}{\rho_a} - \frac{c_{p,a,ref} t_{re}}{\rho_{a,ref}} \right) \quad (27)$$

式中: $q_{v,f}$ 为燃料体积流量, m³/h; 此时 $Q_{a,d}$ 仍为进入系统边界的干空气所携带的热量,但单位已变更为 kJ/m³,上式适用于高炉煤气锅炉炉效计算。

3.2 进入系统边界的空气中水蒸气所携带的热量

对于高炉煤气锅炉,GB/T 10184—2015 中进入系统边界的空气中水蒸气所携带的热量^[4]计算等式中两侧等式单位不统一,等式右侧漏掉标准状态下水蒸气比容 1.24 m³/kg,正确计算公式为:

$$Q_{wv} = 1.24 \times 1.293 \alpha V_{a,d,th,g} h_{a,ab} c_{p,wv} (t_a - t_{re}) \quad (28)$$

式中: Q_{wv} 为进入系统边界的空气中水蒸气所携带的热量, kJ/m³; $c_{p,wv}$ 为进入系统边界的冷风温度确定的水蒸气定压比热容, kJ/(m³·K)。

3.3 每标准立方米燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积

对于高炉煤气锅炉,GB/T 10184—2015 中每标准立方米燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积 $V_{wv,fg,lv}$ 计算公式中使用的是第 2 种燃气基准,且公式中 $m/2$ 应修改为 $n/2$,正确计算公式为:

$$V_{wv,fg,lv} = \frac{1}{100} \left(\varphi_{H_2,g,d} + \frac{n}{2} \varphi_{C_m H_n, g,d} \right) + \frac{h_g}{0.804} + \frac{1.293 \alpha V_{a,d,th,g} h_{a,ab}}{0.804} \quad (29)$$

对于第 1 种燃气基准,每标准立方米燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积 $V_{wv,fg,lv}$ 计算公式为:

$$V_{wv,fg,lv} = \frac{1}{100} \left(\varphi_{H_2,g} + \frac{n}{2} \varphi_{C_m H_n, g} \right) + \varphi_{H_2O,g} + \frac{1.293 \alpha V_{a,d,th,g} h_{a,ab}}{0.804} \quad (30)$$

4 计算实例与分析

4.1 机组概况

以 1 台设置有煤加的高炉煤气锅炉作为研究对象,某 145 MW 等级高效超临界参数高炉煤气锅炉为超临界参数直流炉,单炉膛、平衡通风、一次再热、全钢架构、全悬吊结构燃气锅炉,锅炉技术参数见表 2。

表 2 高炉煤气锅炉技术参数
Tab.2 Technical parameters of BFG boiler

项目	BMCR 工况下的数值
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	430.00
主蒸汽压力/MPa	25.40
主蒸汽温度/°C	605.00
给水压力/MPa	29.40
给水温度/°C	292.90
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	354.53
再热器进口蒸汽压力/MPa	4.98
再热器进口蒸汽温度/°C	362.80
再热器出口蒸汽压力/MPa	4.73
再热器出口蒸汽温度/°C	603.00
空预器出口烟温/°C	206.00
煤加出口烟温/°C	140.00

4.2 高炉煤气锅炉炉效计算结果及分析

表 3 为高炉煤气锅炉炉效计算结果。由表 3 可见,高炉煤气锅炉炉效测试中,过量空气系数为 1.23,实测锅炉效率为 92.86%,修正后锅炉效率为 91.92%。若按 GB/T 10184—2015 进行计算,得出的过量空气系数为 1.11,最终按标准计算得到的修正后锅炉效率为 92.40%,锅炉效率相对偏差值为 0.52%,可以看出此项参数计算方式上的差异会导致炉效计算产生较大误差,在炉效计算时需格外注意。

在煤加出口排烟中 CO₂ 体积分数计算过程中,通过计算方式得到的煤加出口排烟中 CO₂ 体积分数为 29.70%,而按 GB/T 10184—2015 计算得到的煤加出口排烟中 CO₂ 体积分数为 31.28%,CO₂ 体积分数相对偏差值为 5.34%,偏差较大,建议按 2.5 节方式计算得到煤加出口排烟中 CO₂ 体积分数。

表 3 高炉煤气锅炉炉效计算结果
Tab.3 Furnace efficiency calculation results of BFG boiler

项目	设计值	实测值
煤气压力/kPa	10.00	8.43
煤气温度/°C	40.0	45.8
$\varphi_{N_2,g}/\%$	51.44	41.87
高炉煤气参数		
$\varphi_{H_2,g}/\%$	1.68	2.77
$\varphi_{CO_2,g}/\%$	16.34	20.85
$\varphi_{CO,g}/\%$	23.62	25.25
$\varphi_{CH_4,g}/\%$	0.28	0
$\varphi_{O_2,g}/\%$	0	0.10
$\varphi_{H_2O,g}/\%$	6.64	9.16
$Q_{net,g}/(kJ\cdot m^{-3})$	3 266.3	3 490.0
燃料特性系数	-0.26	-0.36
运行参数		
空预器进口冷风温度/°C	23.0	46.0
煤加出口排烟温度/°C	140.0	140.5
煤加出口排烟中 $\varphi_{O_2}/\%$		2.02
煤加出口排烟中 $\varphi_{CO}/\%$		0.002
煤加出口排烟中 φ_{CO_2} (实测值)/%		29.65
空预器出口烟温/°C	205.0	192.3
空预器进口烟温/°C	310.0	292.3
下级省煤器进口烟温/°C	390.0	372.1
给水温度/°C	287.7	278.9
计算过程参数		
煤加出口排烟中 φ_{CO_2} (计算值)/%		29.70
理论燃烧干空气量/($m^3\cdot m^{-3}$)		0.66
理论燃烧干烟量/($m^3\cdot m^{-3}$)		1.40
每立方米气体燃料实际烧掉的碳计算的 φ_{CO_2} /($m^3\cdot m^{-3}$)		0.46
理论干烟量中的理论 N_2 量/($m^3\cdot m^{-3}$)		0.94
实际生成干烟量/($m^3\cdot m^{-3}$)		1.55
过量空气系数		1.23
实测锅炉效率		
排烟热损失/%	8.49	8.13
气体未完全燃烧热损失/%	0.37	0.01
固体未完全燃烧热损失/%	0	0
锅炉散热损失/%	0.23	0.23
灰、渣物理热损失/%	0	0
其他热损失/%	0.20	0.20
外来热量与气体燃料低位发热量的百分比/%	0.55	1.43
锅炉效率/%	91.28	92.86
锅炉效率修正		
按煤加进口煤气温度设计值修正后的排烟温度/°C	140.0	138.4
按空预器进口风温设计值修正后的排烟温度/°C	140.0	136.0
按给水温度设计值修正后的排烟温度/°C	140.0	143.3
最终修正后煤加出口排烟温度/°C	140.0	136.9
修正后排烟热损失/%	8.49	8.19
修正后外来热量与气体燃料低位发热量的百分比/%	0.55	0.55
修正后锅炉效率/%	91.28	91.92
数据分析		
按标准计算的过量空气系数		1.11
按标准计算的实际生成干烟量/($m^3\cdot m^{-3}$)		1.47
按标准计算的煤加出口排烟中 φ_{CO_2} (计算值)/%		31.28
煤加出口排烟中 φ_{CO_2} (计算值)相对偏差/%		5.35
按标准计算的锅炉效率/%		93.35
按标准计算的修正后锅炉效率/%		92.40
修正后锅炉效率相对偏差/%		0.52

另外,在高炉煤气锅炉炉效测试中,通过高炉煤气参数、煤加出口排烟中氧含量及 CO 体积分数计算得出的煤加出口排烟中 CO₂ 体积分数的计算值与实测值进行比对,可以相互验证高炉煤气及烟气分析仪中各参数的测试精度。

5 结论与建议

1) 燃气基准的差异导致高炉煤气水分体积分数/含水量及低位发热量的计算方法不同,分别列出了 2 种燃气基准下高炉煤气水分的计算方法及低位发热量的换算方法。

2) 针对高炉煤气锅炉燃料含氮量高的特性,提出 3 种适用于高炉煤气锅炉的过量空气系数、实际烟量及烟气中 CO₂ 体积分数的求解方法。另外 GB/T 10184—2015 中过量空气系数及烟气中 CO₂ 体积分数的计算方法会导致高炉煤气锅炉炉效计算产生较大误差,在炉效计算时需格外注意。

3) 结合高炉煤气锅炉尾部受热面布置特点,提出了适用于含煤气加热器的高炉煤气锅炉排烟温度的修正方法。

4) GB/T 10184—2015 对进入系统边界的干空气、空气中水蒸气所携带的热量及每标准立方米燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积的计算有待于进一步探讨,并作适当修改。

[参考文献]

- [1] 叶亚兰, 司凤琪, 徐治皋. 高炉煤气锅炉热效率计算方法[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 21-27.
YE Yalan, SI Fengqi, XU Zhigao. Calculation methods of heat efficiency for blast furnace gas boilers[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 21-27.
- [2] 张鑫莆, 宋宝军, 杨晓光, 等. 高效超临界燃用低热值煤气锅炉研发设计[J]. 电站系统工程, 2022, 38(4): 28-30.
ZHANG Xinpu, SONG Baojun, YANG Xiaoguang, et al. R&D and design of high-efficiency supercritical gas-fired low-calorific value boiler[J]. Power System Engineering, 2022, 38(4): 28-30.
- [3] 杨磊. GB/T 10184—2015 与 GB/T 10184—1988 锅炉效率计算对比[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 113-119.
YANG Lei. Comparison of boiler efficiency calculation methods based on GB/T 10184—2015 and GB/T 10184—1988[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 113-119.
- [4] 张步庭, 李玲, 王贺岑, 等. GB/T 10184—2015 与 GB 10184—88 锅炉效率计算差异分析[J]. 锅炉技术, 2022, 53(3): 48-53.
ZHANG Buting, LI Ling, WANG Hecen, et al. Analysis of differences in boiler efficiency calculation between GB/T 10184—2015 and GB 10184—1988[J]. Boiler Technology, 2022, 53(3): 48-53.
- [5] 孙培波, 杨永伟, 翟永强, 等. 基于 ASME 及 GB 能量

- 平衡法下锅炉热效率不确定度评定及敏感性分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(4): 121-127.
- SUN Peibo, YANG Yongwei, ZHAI Yongqiang, et al. Uncertainty calculation and sensitivity analysis in steam generator thermal efficiency test based on ASME and GB energy balance method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(4): 121-127.
- [6] 李勇, 韩为, 王艳红. 基于 GB 10184—88 标准的锅炉热效率修正方法分析及比较[J]. 中国电力, 2014, 47(3): 48-54.
- LI Yong, HAN Wei, WANG Yanhong. The analysis and comparison of boiler thermal efficiency correction method based on GB 10184—88 code[J]. Electric Power, 2014, 47(3): 48-54.
- [7] 李超. 基于 GB 10184—88 标准和 GB 10184—2015 标准的锅炉热效率比较与分析[J]. 锅炉制造, 2018, (1): 1-4.
- LI Chao. Comparison and analysis of boiler thermal efficiency based on GB 10184-88 and GB 10184—2015[J]. Boiler Manufacturing, 2018, (1): 1-4.
- [8] 电站锅炉性能试验规程: GB/T 10184—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 4-7.
- Performance test code for utility boiler: GB/T 10184—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 4-7.
- [9] 电站锅炉性能试验规程: GB 10184—1988[S]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 23-30.
- Performance test code for utility boiler: GB 10184—1988[S]. Beijing: China Machine Press, 1988: 23-30.
- [10] 江文豪, 姚群. 煤气锅炉效率计算模型研究[J]. 冶金动力, 2014(12): 42-45.
- LI Yong, HAN Wei, WANG Yanhong. A research on the calculation model for the efficiency of gas boiler[J]. Metallurgical Power, 2014(12): 42-45.
- [11] 叶亚兰, 司凤琪, 徐治皋, 等. 煤气锅炉主要运行参数的煤耗偏差分析[J]. 热力发电, 2014, 43(11): 112-115.
- YE Yalan, SI Fengqi, XU Zhigao, et al. Coal consumption deviation analysis of main operation parameters in gas boilers[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(11): 112-115.
- [12] 叶亚兰, 司凤琪, 徐治皋, 等. 煤粉与高炉煤气混烧锅炉的热效率计算方法研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(2): 86-92.
- YE Yalan, SI Fengqi, XU Zhigao, et al. Research on thermal efficiency calculation method for boiler mixedly burning pulverized coal and BFG[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(2): 86-92.
- [13] 江文豪, 张学超, 余波. GB/T 10184 对于煤粉与高炉煤气混烧锅炉性能计算的适用性及改进分析[J]. 中国冶金, 2020, 30(12): 105-111.
- JIANG Wenhao, ZHANG Xuechao, YU Bo. Application and improvement analysis of GB/T 10184 for performance calculation of pulverized coal and blast furnace gas co-fired boilers[J]. China Metallurgy, 2020, 30(12): 105-111.
- [14] 郝勇生, 殷捷, 王培红, 等. 改进的煤气发电锅炉耗差分析模型[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 91-96.
- HAO Yongsheng, YIN Jie, WANG Peihong, et al. An improved energy-loss analysis model for gas power boilers[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 91-96.
- [15] 同济大学. 燃气燃烧与应用[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 5.
- Tongji University. Gas combustion and application[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 5.

(责任编辑 邓玲惠)