

DOI: 10.19666/j.rlfed.202303047

存在系统边界外热量损失的锅炉效率 计算方法

王宏武¹, 刘欢¹, 于龙文², 杨荣祖², 穆祺伟², 张奔²,
翟鹏程², 谢天², 马汀山²

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
2.西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 对用于系统边界外设备的热量进行分析, 能量转换位置在 GB/T 10184 中的锅炉边界外, 不能利用现有标准进行锅炉效率计算。将热风外用损失热量分为热风回用和热风不回用 2 类, 基于 GB/T 10184 的计算框架, 提出这 2 类热风外用损失的计算方法。以某 350 MW 机组锅炉作为实际算例, 在相同负荷下连续进行投运热风外用和停运热风外用 2 个对比工况。依据实际测试数据和化验结果, 利用该计算方法对实际运行工况进行对比, 定量分析热风外用对锅炉效率的影响。计算结果表明: 2 个工况燃用煤质、飞灰、炉渣可燃物化验结果基本相当; 冷风回收的工况 T01 热风外用损失为 0.82%, 冷风不回收的热风外用损失为 0.13%, 工况 T02 热风外用损失为 0; 工况 T01、工况 T02 实测锅炉效率分别为 93.10%、94.00%, 投运热风外用系统使锅炉效率下降约 0.9 个百分点。

[关键词] 锅炉效率; 计算方法; GB/T 10184; 系统边界; 热风外用

[引用本文格式] 王宏武, 刘欢, 于龙文, 等. 存在系统边界外热量损失的锅炉效率计算方法[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 140-146. WANG Hongwu, LIU Huan, YU Longwen, et al. Boiler efficiency calculation method for heat loss outside the system boundary[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 140-146.

Boiler efficiency calculation method for heat loss outside the system boundary

WANG Hongwu¹, LIU Huan¹, YU Longwen², YANG Rongzu², MU Qiwei², ZHANG Ben²,
ZHAI Pengcheng², XIE Tian², MA Tingshan²

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2.Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: For the analysis of the heat applied to equipment outside the system boundary, the energy utilized was outside the GB/T 10184 standard, and the boiler efficiency calculation could not take advantage of the existing standard. The external heat loss of hot air was divided into two categories: hot air reuse and hot air non-reuse. Based on the GB/T 10184 calculation framework, the calculation methods of these two categories of external heat loss of hot air were proposed. Taking a 350 MW boiler as a practical example, under the same load, continuous operation of hot air external use and shutdown of hot air external use were compared. According to the actual test data and analysis results, the calculation method was used to compare the actual operating conditions. The influence of external loss of hot air on boiler efficiency was analyzed. The results showed that the test results of combustible materials in two working conditions were basically the same. The external loss of hot air in T01 (cold air recovery) was 0.82%, the external loss of hot air (cold air nonrecovery) was 0.13%, and the external loss of hot air in T02 was 0. The measured boiler efficiency in T01 and T02 conditions was 93.10% and 94.00% respectively. The operation of external hot air system reduced the boiler efficiency by about 0.9 percentage point.

Key words: boiler efficiency; calculation method; GB/T 10184; system boundary; hot air for external use

收稿日期: 2023-03-28

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-H66)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H66)

第一作者简介: 王宏武 (1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火电机组节能减排技术, wanghongwu@tpri.com.cn.

锅炉效率是锅炉设备性能和运行经济性评价的一项重要指标^[1], 测试锅炉效率需要通过锅炉性能试验^[2]。在大容量电站锅炉性能考核、运行状态评估、锅炉检修评价、锅炉设计计算、燃烧优化调整、大型设备改造等情形下^[3-9], 均需要对电站锅炉进行多工况的效率试验。

目前, 国际上主要采用美国机械工程师协会发布的《锅炉性能试验规程》(ASME PTC4—2013) 作为锅炉效率试验的标准^[10], 国内主要采用《电站锅炉性能试验规程》(GB/T 10184—2015) 作为锅炉效率试验的标准^[11]。目前, 对于锅炉效率计算方法的研究主要集中在 ASME PTC4 的分析与应用^[12-13]、GB/T 10184 的分析与应用^[14]、ASME PTC4 与 GB/T 10184 间的区别^[15-18]、各版本的 ASME PTC4 间的区别^[19]、各版本的 GB/T 10184 间的区别^[20-22]、ASME PTC4 与 GB/T 10184 部分参数修正方法的优化等^[23-25]。

这些锅炉效率的研究基本都在锅炉系统的边界范围内进行, 能量传递只在锅炉内部各设备之间进行。然而目前部分科研院所和电力生产企业在对锅炉设备进行跨边界改造, 存在锅炉系统内的能量离开系统边界, 被系统边界外设备使用的情况。在这种情况下, 实际的锅炉效率及机组煤耗不能用现有标准试验测量和计算。

本文首先对用于系统边界外设备的热量进行分析, 指出其超出了现有标准的边界, 不能使用 GB/T 10184 进行锅炉效率计算。将这部分损失的热量定义为热风外用损失热量, 并把热风外用损失热量分为热风回用和热风不回用 2 类, 基于 GB/T 10184 的计算框架, 提出热风外用损失的计算方法。以某 350 MW 锅炉作为实际算例, 连续进行投运热风外用和停运热风外用 2 个对比工况。基于上述计算方法, 依据实际测试数据和分析化验结果, 对实际运行工况进行对比, 定量分析热风外用对锅炉效率的影响。

1 GB/T 10184—2015 锅炉效率计算方法

1.1 系统边界

GB/T 10184—2015 中规定, 锅炉机组热平衡系统边界内设备包括带循环泵的汽水系统、带磨煤机的制粉系统、燃烧设备、脱硝装置、空气预热器、烟气再循环风机等。系统边界外设备包括暖风机、一次风机、送风机、引风机、高压流化风机、密封

风机、冷却风机、冷却水泵、供氨系统等。

1.2 锅炉效率计算方法

锅炉热效率的计算采用输入-输出热量法和热损失法 2 种方法, 对于大型锅炉推荐采用热损失法。采用热损失法计算锅炉效率为:

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{\text{loss}} - Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{net.ar}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

式中: η 为锅炉效率, %; Q_{loss} 为锅炉总损失热量, kJ/kg; Q_{ex} 为输入系统边界的外来热量, 也就是除入炉燃料发热量以外的所有输入热量, kJ/kg; $Q_{\text{net.ar}}$ 为入炉燃料低位发热量, kJ/kg。

锅炉总损失热量包括排烟热损失热量、气体未完全燃烧损失热量、固体未完全燃烧损失热量、锅炉散热损失热量、灰渣物理显热损失热量和其他损失热量。由此式(1)可写成:

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{\text{oth}} - Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{net.ar}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

式中: 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, %。

1.3 其他热损失计算方法

其他损失热量 Q_{oth} 为:

$$Q_{\text{oth}} = Q_{\text{pr}} + Q_{\text{cw}} \quad (3)$$

式中: Q_{pr} 为石子煤带走的热量, kJ/kg; Q_{cw} 为冷却水带走的热量, kJ/kg。

因此计算其他热损失热量时, 只包括中速磨煤机排出石子煤的热量和进入锅炉系统边界的冷却水吸收的热量 2 项未被利用的热量 (如循环水泵电机冷却水等)。

2 问题提出

国内现行 GB/T 10184—2015 中规定, 锅炉尾部烟气系统出口边界设备为空气预热器, 具体位置为空气预热器本体与空气预热器出口烟道交界处。

空气预热器是高温烟气与低温空气进行换热的设备, 高温烟气释放热量温度降低, 低温空气吸收热量温度升高。高温烟气所释放的热量全部用于加热低温空气, 温度升高后的空气将热量用于锅炉系统内部, 热一次风在制粉系统用于加热煤粉, 热二次风进入炉膛参与燃烧。常规空气预热器是锅炉机组热平衡系统边界内设备, 能量的转换均在系统

边界内完成,不存在能量外溢的情况。

目前存在经空气预热器加热后的热风离开系统边界,用于系统边界外设备加热或使用的情况。这部分热风经系统边界外设备利用后温度降低,降温后存在2种流程:一种为高温空气在系统边界外设备释放能量后降温成低温空气,低温空气返回空气预热器入口冷风道,经由空气预热器再次加热后,再次进入系统边界外设备换热,形成循环,此流程相当于热量外溢工质回收;另一种为高温空气在系统外部设备内直接被使用,不回收低温空气,此流程相当于能量和工质均不回收。

针对以上空气预热器出口热风用于系统边界外设备情况,GB/T 10184—2015未提供相关的损失热量算法,因此本文对相关计算方法进行分析推导。

3 计算方法建立

3.1 损失热量计算框架建立

现将空气预热器出口热风热量被系统边界外设备使用的这部分损失能量定义为热风外用损失热量。

依据GB/T 10184—2015中的损失热量划分,热风外用损失不属于排烟热损失、气体未完全燃烧热损失、固体未完全燃烧热损失、锅炉散热损失、灰渣物理显热损失。在计算其他热损失热量时,只包括中速磨煤机排出石子煤的热量和进入锅炉系统边界的冷却水吸收的热量2项未被利用的热量(如循环水泵电机冷却水等),因此热风外用损失热量也不属于其他热损失热量。综上,热风外用损失热量不属于GB/T 10184—2015中已知的各项损失热量,需要对热风外用损失热量建立新的计算方法。

在GB/T 10184—2015中计算各项热损失时,均采用该项损失热量除以入炉燃料低位发热量的形式。因此热风外用损失也宜采用这种形式,即热风外用损失热量除以入炉燃料低位发热量。在计算锅炉效率时,是以每千克燃料量作为基础进行计算的。因此热风外用损失计算也应以每千克燃料量作为基础进行计算。

在计算排烟热损失或固体未完全燃烧热损失时,每千克燃料量燃烧生产的实际烟气量、每千克燃料量燃烧生产的灰渣平均可燃物等关键参数都可以通过理论计算得到。以上2项热损失计算中的

关键参数均与单位燃料量存在理论关系式,但是计算热风外用损失时,涉及的关键参数是被系统边界外设备使用的空气预热器出口热风风量。此部分热风量主要由系统边界外使用热风的设备决定,与单位燃料量不存在理论计算关系。因此热风外用损失计算应采用实际热风量除以实际燃料量的形式。单位质量热风带走的热量采用热风进出系统焓值做差的形式。

3.2 冷风回收的热风外用损失计算

空气预热器出口热风用于系统边界外设备后,存在2种流程:一种流程是低温空气返回空气预热器入口冷风道形成循环,冷风回收;另一种流程是热风在系统外设备内直接被使用,冷风不回收。

对冷风回收的热风外用损失热量按式(4)进行计算:

$$Q_{\text{add.1}} = \frac{q_{\text{m.aa.1}}}{q_{\text{m.f}}} (H_{\text{aa.lv.1}} - H_{\text{aa.en.1}}) \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{add.1}}$ 为热风外用损失热量(冷风回收),kJ/kg; $q_{\text{m.aa.1}}$ 为热风流量,kg/h; $q_{\text{m.f}}$ 为燃料质量流量,kg/h; $H_{\text{aa.lv.1}}$ 为离开系统的热风焓值,kJ/kg; $H_{\text{aa.en.1}}$ 为返回系统的冷风焓值,kJ/kg。

热风外用损失(冷风回收)按式(5)计算:

$$q_{\text{add.1}} = \frac{Q_{\text{add.1}}}{Q_{\text{net.ar}}} \times 100 \quad (5)$$

式中: $q_{\text{add.1}}$ 为热风外用损失(冷风回收),%。

3.3 冷风不回收的热风外用损失计算

对冷风不回收的热风外用损失热量按式(6)进行计算:

$$Q_{\text{add.2}} = \frac{q_{\text{m.aa.2}}}{q_{\text{m.f}}} (H_{\text{aa.lv.2}} - H_{\text{re}}) \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{add.2}}$ 为热风外用损失热量(冷风不回收),kJ/kg; $q_{\text{m.aa.2}}$ 为热风流量,kg/h; $H_{\text{aa.lv.2}}$ 为离开系统的热风焓值,kJ/kg; H_{re} 为基准温度下的空气焓值,kJ/kg。

热风外用损失(冷风不回收)按式(7)计算:

$$q_{\text{add.2}} = \frac{Q_{\text{add.2}}}{Q_{\text{net.ar}}} \times 100 \quad (7)$$

式中: $q_{\text{add.2}}$ 为热风外用损失(冷风不回收),%。

3.4 锅炉效率

存在热风外用损失热量的情况下,采用热损失法计算锅炉效率为:

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{\text{oth}} + Q_{\text{add.1}} + Q_{\text{add.2}} - Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{net.ar}}} \right) \times 100 \quad (8)$$

4 实际算例

以某厂 1 号锅炉作为实际算例, 该锅炉是哈尔滨锅炉厂制造的超临界参数、变压运行、单炉膛、一次中间再热、前后墙对冲、平衡通风、固态排渣、侧煤仓布置、露天岛式布置、全钢架、悬吊结构、 Π 型布置、螺旋管圈、直流炉, 型号为 HG-1135/25.4-YM1。制粉系统采用中速磨正压直吹式, 燃烧器布置方式为前后墙对冲。

1 号锅炉近期完成了烟羽消白改造和脱硫废水零排放改造。烟羽消白改造中增设烟气热风加热系统。烟气热风加热系统包括净风系统、二次风循环系统及风风换热器。洁净空气由净风风机送入风风换热器, 被空气预热器出口来的热二次风加热后送至净烟道与脱硫净烟气混合, 混合烟气温度升高, 烟气相对湿度降低, 避免了烟囱出口发生烟气中水蒸气冷凝造成的烟囱白烟现象。风风换热器采用管式空气换热器, 热二次风经过风风换热器换热降温, 出口低温二次风送至二次风循环风机入口, 经风机升压后送至空气预热器前二次风管道。烟气热风加热系统如图 1 所示。

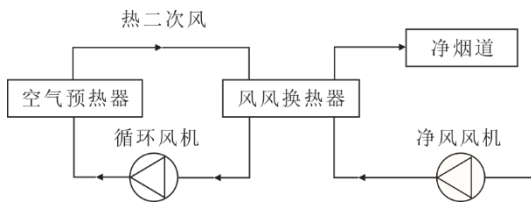


图 1 烟气热风加热系统

Fig.1 The flue gas hot air heating system

脱硫废水零排放改造中增设浓缩浆液干燥系统。浆液干燥系统主要包括热风风机、冷风风机及惰性载体干燥床。从空气预热器出口热二次风管道上抽取热二次风作为干燥介质, 经冷风风机调节出口风温, 通过热风风机增压后进入惰性载体干燥床。在干燥床内处于流化状态的浆液与高温热风进行热质交换, 后经烟囱排出。浓缩浆液干燥系统如图 2 所示。

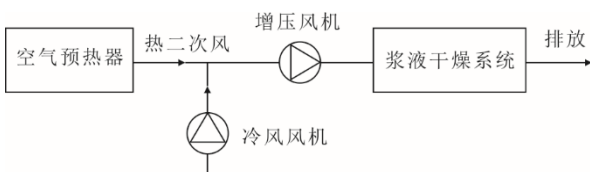


图 2 浓缩浆液干燥系统

Fig.2 The slurry drying system

在烟气热风加热系统中, 从空气预热器出口引出一部分热二次风经过风风换热器换热后, 经循环风机后返回至空气预热器进口冷二次风道。此部分热二次风的热量并未被锅炉使用, 而是经过风风换热器换热后加热脱硫出口净烟气, 消除烟囱白色烟羽, 此部分热量利用位置属于锅炉边界外, 属于存在冷风回收的热风外用损失热量, 应按式(4)进行计算。此外从空气预热器出口引出另一部分热二次风用于脱硫浆液干燥系统, 此部分的热二次风被利用后不返回被循环利用, 而是直接经由烟囱排放。此部分热量利用位置也属于锅炉边界外, 属于存在冷风不回收的热风外用损失热量, 应按式(6)进行计算。

在该实际算例上, 连续进行 2 个 350 MW 满负荷工况的试验, 分别为投运热风外用工况 T01 和停运热风外用工况 T02。对每个工况燃用原煤、飞灰可燃物及炉渣可燃物取样化验, 对空气预热器出口烟气成分、烟气温度、各系统风温及环境温度、湿度进行测量。依据各实测数据对工况 T01 和工况 T02 的锅炉效率进行计算, 锅炉效率试验计算结果见表 1。

工况 T01 存在热风外用损失, 采用本文所述方法对热风外用损失进行计算; 工况 T02 为对比工况, 不存在热风外用损失, 采用 GB/T 10184—2015 进行计算。

工况 T01 和工况 T02 连续进行试验, 从煤质元素分析结果及水分、灰分和收到基低位发热量可知, 2 个工况燃用煤质总体上差异较小, 由此引起的锅炉效率偏差较小。工况 T01 飞灰、炉渣可燃物分别为 2.01%、0.29%, 工况 T02 飞灰、炉渣可燃物分别为 1.81%、0.39%, 2 个工况飞灰、炉渣可燃物基本相当, 2 个工况固体未完全燃烧热损失均处于较小水平。工况 T01 和 T02 空气预热器出口烟气中均测得一定量的 CO, 2 个工况气体未完全燃烧热损失基本相当。

工况 T01 排烟温度为 124.0 °C, 工况 T02 排烟温度为 132.7 °C, 工况 T01 排烟温度较 T02 偏低约 8.7 °C, 对于相同负荷工况下的 2 个工况排烟温度偏差较大。2 个工况空气预热器入口烟气温度分别为 357.0、355.6 °C, 温度基本相当。分析排烟温度偏差较大的主要原因是, 在维持炉膛氧量基本一致的前提下, 通过空气预热器作为炉膛二次风的风量基本相同, 通过空气预热器的烟气量和烟气温度也基本相同。工况 T01 存在大量的外用热风, 通过空气预热器的二次风总量增加。外用热风返回空预器

进口与冷风混合,风温升高,使得空气预热器的整体换热温压减小。二次风量增加强化空气预热器换热,传热温压减小削弱空预器换热,经过二者综合影响后,2个工况空气预热器出口二次风温度分别为323.8、343.3℃,工况T01二次风温较T02偏低约19.5℃。工况T01和T02排烟热损失分别为4.95%、5.14%,工况T01排烟热损失比工况T02偏低约0.2百分点。

表1 锅炉效率试验计算结果
Tab.1 Boiler efficiency test results

项目	工况 T01	工况 T02
机组负荷/MW	350	350
碳的质量分数/%	48.60	47.97
氢的质量分数/%	2.96	2.22
氧的质量分数/%	12.72	13.75
氮的质量分数/%	0.55	0.54
硫的质量分数/%	0.22	0.25
水分/%	29.00	31.52
灰分/%	5.95	3.75
收到基低位发热量/(kJ·kg ⁻¹)	18 032.4	17 929.9
燃煤量/(t·h ⁻¹)	161.8	163.2
烟气热风加热系统风量/(kg·h ⁻¹)	75 734.3	0
空气预热器出口二次风温/℃	323.8	343.3
循环风机出口风温/℃	135.1	32
浓缩浆液干燥系统风量/(kg·h ⁻¹)	7772.3	0
大气压力/kPa	101.3	101.3
湿球温度/℃	24.1	22.9
送风温度/℃	29.6	29.5
飞灰比率/%	90	90
炉渣比率/%	10	10
飞灰可燃物质量分数/%	2.01	1.81
炉渣可燃物质量分数/%	0.29	0.39
灰渣平均可燃物质量分数/%	1.88	1.70
实际燃烧掉的碳占入炉燃料的质量分数/%	48.49	47.91
空气预热器入口烟气温度/℃	357.0	355.6
空气预热器出口氧量/%	4.71	4.72
空气预热器出口一氧化碳质量分数/%	0.061 8	0.057 3
排烟温度/℃	124.0	132.7
排烟热损失/%	4.95	5.14
气体未完全燃烧热损失/%	0.27	0.23
固体未完全燃烧热损失/%	0.21	0.12
散热损失/%	0.18	0.18
灰渣物理热损失/%	0.05	0.03
热风外用损失(冷风回收)/%	0.82	0
热风外用损失(冷风不回收)/%	0.13	0
未测量热损失/%	0.3	0.3
总的热损失/%	6.90	6.00
锅炉效率/%	93.10	94.00

工况T01存在大量的外用热风,烟气热风加热系统外用热二次风量为75 734.3 kg/h,外用热二次

风取自空气预热器出口,二次风温为323.8℃,经风风换热器利用后,返回空气预热器进口的风温为135.1℃。浓缩浆液干燥系统外用热二次风量为7 772.3 kg/h,外用热二次风取自空气预热器出口,二次风温为323.8℃,热二次风在干燥系统利用后不返回。工况T02停运热风外用,外用热风为0。工况T01热风外用损失(冷风回收)为0.82%,热风外用损失(冷风不回收)为0.13%,热风外用总损失为0.95%,工况T02热风外用损失为0。

工况T01实测锅炉效率为93.10%,工况T02实测锅炉效率为94.00%,由于投运热风外用系统使锅炉效率下降约0.9百分点。

5 结 论

1) 依据《电站锅炉性能试验规程》(GB/T 10184—2015)的系统边界和锅炉效率计算方法,存在经空气预热器加热后的热风离开锅炉系统用于其他辅助设备,同时热风使用位置已经超出锅炉系统边界的情况,标准中未提供相关的损失热量算法。

2) 将空气预热器出口热风热量被系统边界外设备使用的这部分损失能量定义为热风外用损失热量。基于GB/T 10184—2015建立外用损失热量计算公式。

3) 热风外用存在2种流程:一种流程是低温空气返回空气预热器入口冷风道形成循环,冷风回收;一种流程是热风在系统外设备内直接被使用,冷风不回收。建立冷风回收热风外用损失和冷风不回收热风外用损失的计算方法。

4) 在某实际算例上连续进行投运热风外用的工况T01和停运热风外用的工况T02,试验负荷均为350 MW,2个工况燃用煤质、飞灰、炉渣可燃物化验结果基本相当。工况T01热风外用损失(冷风回收)为0.82%,热风外用损失(冷风不回收)为0.13%,工况T02热风外用损失为0。工况T01、T02实测锅炉效率分别为93.10%、94.00%,投运热风外用系统使锅炉效率下降约0.9百分点。

[参 考 文 献]

- [1] 火力发电厂技术经济指标计算方法:DL/T 904—2015[S].北京:中国电力出版社,2015:10-40.
Calculating method of economical and technical index for thermal power plant:DL/T 904—2015[S].Beijing:China Electric Power Press,2015:10-40.
- [2] 王建江,孜克亚尔,李涛,等.锅炉热效率试验不确定度计算及敏感性分析[J].热能动力工程,2017,32(6):118-122.

- WANG Jianjiang, ZI Keyaer, LI Tao, et al. Uncertainty calculation and sensitivity analysis in boiler thermal efficiency test[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2017, 32(6): 118-122.
- [3] 许德昌. 基于大数据分析的电站锅炉性能预测及优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
XU Dechang. Performance prediction and optimization of utility boiler based on big data analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [4] 王宏武, 刘欢, 井新经. 1 000 MW 超超临界锅炉燃烧系统数值模拟及工程应用[J]. *热能动力工程*, 2019, 34(8): 169-175.
WANG Hongwu, LIU Huan, JING Xinjing. Numerical simulation and engineering application of 1 000 MW ultra supercritical boiler combustion system[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2019, 34(8): 169-175.
- [5] 李宗琪. 电厂燃煤锅炉热效率智能软测量与能耗分布诊断方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020: 1.
LI Zongqi. Research on intelligent soft sensing of thermal efficiency and energy consumption distribution diagnosis method of coal fired boiler in power plant[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020: 1.
- [6] 高博楠. 基于图像识别的灰渣含碳量在线检测及锅炉效率快速计算方法研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021: 1.
GAO Bonan. Research on online detection of carbon content in ash and slag and fast calculation method of boiler efficiency based on image recognition[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2021: 1.
- [7] BLACKBURN L D, TUTTLE J F, ANDERSSON K, et al. Dynamic machine learning-based optimization algorithm to improve boiler efficiency[J]. *Journal of Process Control*, 2022, 120(1): 129-149.
- [8] 张建中, 曹理平, 李政. 机炉深度耦合系统设计与试验中的锅炉效率失准问题及对节煤效益影响分析[J]. *热力发电*, 2022, 51(7): 61-71.
ZHANG Jianzhong, CAO Liping, LI Zheng. Inaccuracy of boiler efficiency in design and test of turbine-boiler deeply coupled system and analysis of its influence on coal-saving benefits[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(7): 61-71.
- [9] 陈波, 曹歌瀚, 黄亚继, 等. 基于机器学习的燃煤锅炉燃烧效率在线计算[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(4): 174-179.
CHEN Bo, CAO Gehan, HUANG Yaji, et al. Online calculation of coal-fired boiler combustion efficiency based on machine learning[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(4): 174-179.
- [10] 锅炉性能试验规程: ASME PTC4—2013[S]. 美国机械工程师协会, 2013: 1-122.
Fired steam generators performance test codes: ASME PTC4—2013[S]. The American Society of Mechanical Engineers, 2013: 1-122.
- [11] 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: 1-51.
Performance test codes for utility boiler: GB/T 10184—2015[S]. Beijing: China Standards Press, 2015: 1-51.
- [12] 阎维平, 云曦. ASME PTC4—1998 锅炉性能试验规程的主要特点[J]. *动力工程学报*, 2007, 27(2): 174-178.
YAN Weiping, YUN Xi. Essentials of boiler performance test code ASME PTC4—1998[J]. *Journal of Power Engineering*, 2007, 27(2): 174-178.
- [13] 杨海生, 张勇胜. ASME PTC4 锅炉性能试验标准中锅炉效率的计算探讨[J]. *锅炉技术*, 2018, 49(2): 17-20.
YANG Haisheng, ZHANG Yongsheng. Discussion of boiler efficiency calculation in ASME PTC4[J]. *Boiler Technology*, 2018, 49(2): 17-20.
- [14] 王艳红, 李勇. 基于 GB 10184—88 的 ASME PTC4—1998 煤粉锅炉热效率的简化算法[J]. *锅炉技术*, 2013, 44(3): 9-14.
WANG Yanhong, LI Yong. Simplified heat efficiency calculation method with ASME PTC4-1998 for pulverized coal fired boiler based on GB 10184—88[J]. *Boiler Technology*, 2013, 44(3): 9-14.
- [15] 王祝成, 孟桂祥, 姚胜, 等. ASME PTC4.1—1964 标准锅炉效率的问题探讨[J]. *锅炉技术*, 2018, 49(4): 27-32.
WANG Zhucheng, MENG Guixiang, YAO Sheng, et al. Discussion on steam generator efficiency in ASME PTC4.1—1964 codes[J]. *Boiler Technology*, 2018, 49(4): 27-32.
- [16] 常勇强, 刘雪敏, 齐国利, 等. 中国锅炉热工性能试验标准与美国 ASME PTC 4—2013 对比研究[J]. *动力工程学报*, 2018, 38(8): 610-616.
CHANG Yongqiang, LIU Xuemin, QI Guoli, et al. Comparative study between Chinese and American boiler performance test codes[J]. *Journal of Power Engineering*, 2018, 38(8): 610-616.
- [17] 李勇, 王艳红, 张炳文. 基于不同标准的锅炉热效率及发电标准煤耗率修正方法[J]. *动力工程学报*, 2012, 32(4): 273-281.
LI Yong, WANG Yanhong, ZHANG Bingwen. Correction of boiler thermal efficiency and standard coal consumption rate based on different standards[J]. *Journal of Power Engineering*, 2012, 32(4): 273-281.
- [18] 林强, 张富祥, 蒋志浩. 基于 ASME PTC4—2013 与 GB/T 10184—2015 标准的锅炉效率计算比较与软件开发[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(2): 47-52.
LIN Qiang, ZHANG Fuxiang, JIANG Zhihao. Comparison of boiler efficiency calculation and software development based on ASME PTC4—2013 and GB/T 10184—2015 standards[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(2): 47-52.
- [19] 王祝成, 孟桂祥, 姚胜, 等. ASME PTC4.1—1964 标准和 ASME PTC4—2013 标准关于锅炉效率计算的區別[J]. *热力发电*, 2018, 47(11): 1-6.
WANG Zhucheng, MENG Guixiang, YAO Sheng, et al. Difference in boiler efficiency calculation between ASME PTC4.1—1964 and ASME PTC4—2013[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(11): 1-6.
- [20] BEHBAHANINIA A, RAMEZANI S, HEJRANDOOST M L. A loss method for exergy auditing of steam boilers[J]. *Energy*, 2017, 140(1): 253-260.
- [21] 张步庭, 李玲, 王贺岑, 等. GB/T 10184—2015 与 GB/T 10184—88 锅炉效率计算差异分析[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(3): 49-53.
ZHANG Buting, LI Ling, WANG Hecen, et al. Analysis of differences in boiler efficiency calculation between GB/T 10184—2015 and GB/T 10184—88[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(3): 49-53.
- [22] 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.

- [23] 王祝成, 施延洲. GB 10184—88 标准中排烟温度修正方法的改进探讨[J]. 锅炉技术, 2011(5): 56-59.
WANG Zhucheng, SHI Yanzhou. Discussion on improvement of correction method of outgoing gas temperature in GB 10184—88 codes[J]. Boiler Technology, 2011(5): 56-59.
- [24] 李勇, 韩为, 王艳红. 基于 ASME PTC4—1998 标准的锅炉热效率微分偏差修正方法分析及比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(17): 2769-2777.
LI Yong, HAN Wei, WANG Yanhong. Analysis and comparison on the differential deviation correction method for boiler thermal efficiency based on ASME PTC4—1998 codes[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(17): 2769-2777.
- [25] 华晓宇, 王睿坤, 裘立春, 等. 基于 ASME 和 GB 两种标准的混煤掺烧锅炉反平衡效率及其不确定度计算[J]. 热力发电, 2016, 45(3): 34-40.
HUA Xiaoyu, WANG Ruikun, QIU Lichun, et al. Anti-balancing efficiency and its uncertainty analysis of boiler burning mixed coal according to ASME and GB standard[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3): 34-40.

(责任编辑 邓玲惠)