

文章编号:1674-2869(2018)05-0580-05

正平衡法在电站锅炉空气预热器热效率计算中的应用

吴尔夫¹,卓旭升^{*1},陈节涛^{1,2},王 为¹

1. 武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430205;
2. 国电汉川发电有限公司,湖北 汉川 431614

摘 要:根据正平衡法的原理,针对燃煤锅炉的空气预热器提出一种能够实时计算其热效率的简易方法,其算法原理是:利用空预器入口和出口处烟温的差值和烟气流量计算出烟气经过空预器释放的热量,以及利用空气经过空预器后的升温空气流量计算出其吸收的热量,从而得到空预器的热效率值。由于烟气的实际流量未知,本文利用燃烧反应式计算出燃料燃烧后生成的干烟气和水蒸气的流量,再加上过剩的空气量,最终得到了烟气的计算流量。将该算法用 MATLAB 语言实现编程后,可对空预器的热效率进行实时计算并绘出运行曲线,这将有助于机组运行人员监视空预器的运行状况。

关键词:空气预热器;传热热效率;烟气流量计算;正平衡法

中图分类号:TK222 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.05.020

Application of Direct Balance Method in Thermal Efficiency Calculation of Air Pre-heater of Boiler in Thermal Power Plant

WU Erfu¹, ZHUO Xusheng^{*1}, CHEN Jietao^{1,2}, WANG Wei¹

1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. GUO DIAN Hanchuan Power Plant Co. LTD, Hanchuan 431614, China

Abstract: According to the principle of direct balance method, this paper presents an algorithm for computing the thermal efficiency of air pre-heater of coal-fired boiler in real time operation. First, the released heat from flue-gas was calculated by using its temperature difference between the inlet and outlet of the pre-heater and its volume flow rate. Then, the absorbed heat was calculated by the volume flow rate of the air flowing through the pre-heater with temperature increment. Finally, the heat efficiency of the air pre-heater was obtained by the ratio of the above two heat flow rates. Because the real flue-gas's volume flow rate was unknown, this paper solved this problem via calculating the volume flow rates of dry flue-gas and water vapor produced by chemical reaction of coal combustion, and adding the surplus air volume flow rate. After programmed with MATLAB language, this algorithm can calculate the real-time thermal efficiency of the air pre-heater and draw its curve, which is expected to help the technicians to monitor the operation of the air pre-heater.

Keywords: air pre-heater; heat transfer efficiency; flue-gas flow calculation; direct balance method

到2020年,我国一次能源消耗中煤炭消耗占的比例仍在60%以上,其中50%左右的煤耗用以发电,火电消耗能源巨大,因此成为国家节能重点

领域^[1]。作为火力发电厂三大主机之一的锅炉,自身也消耗着大量的能源,对于电厂的整体运营有很大的影响。为了有针对性地对锅炉能量利用不

收稿日期:2018-06-30

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(NO.B2015317)

作者简介:吴尔夫,硕士研究生。E-mail: 1044809468@qq.com

*通讯作者:卓旭升,博士,副教授。E-mail: zhuoxusheng@sina.com

引文格式:吴尔夫,卓旭升,陈节涛,等.正平衡法在电站锅炉空气预热器热效率计算中的应用[J].武汉工程大学学报,2018,40(5):580-584.

高的部位进行优化,提高锅炉热效率,获得锅炉最佳的运行方式,需要了解锅炉各部分的能量利用状况。目前,已有不少学者对此进行了研究。马庆玲等^[2]提出适用于现场测试条件下利用热效率法测量锅炉给水泵效率的简化计算公式。张瑞卿等^[3]建立了循环流化床锅炉炉膛传热系数的计算模型,该模型能够合理的反映受热面结构尺寸、床层温度、工质温度等因素对循环流化床锅炉炉膛传热系数的影响。周少祥等^[4]在热力计算的基础上,对锅炉进行了单耗分析,结果表明工质在省煤器上效率最低,成为制约燃煤火电机组发电效率进一步提高的因素。刘家钰^[5]提出了电站锅炉风机进行节能诊断的方法,对降低风机能耗具有指导价值。

空气预热器是电站锅炉的重要组件,其热效率是评价空气预热器设计与运行水平的重要指标。从公开文献上来看,研究空气预热器热效率的不多,本文在国家标准 GB/T 10184—2015《电站锅炉性能试验规程》^[6]的基础上,根据正平衡法的原理,针对 300 MW 锅炉空气预热器的特性,对其热效率进行研究,研究出一种空气预热器热效率的计算方法,以便于电厂对锅炉空气预热器的运行状况进行快速判断。空气预热器布置在锅炉尾部烟道中,其作用是通过烟气的热量对进入锅炉前的空气进行预热,可以降低锅炉的排烟温度,减少排烟热损失,空气经过预热后参加燃烧还能改善燃料的着火和燃烧条件,减少燃料的不完全燃烧损失,从而可以提高锅炉效率^[7-8]。电站锅炉广泛采用的空气预热器有管式和回转式两种,前者的传热方式是热量连续通过管壁由烟气传给空气,烟气与空气拥有各自的通道。后者以再生方式传递热量,烟气与空气交替地通过受热面,热量由烟气传给受热面金属,被其积蓄起来,当烟气流过受热面时,将积蓄的热量传给空气^[9-10]。根据高温烟气与空气在空气预热器中的传热机理,建立空气预热器热交换过程模型,如图 1 所示。

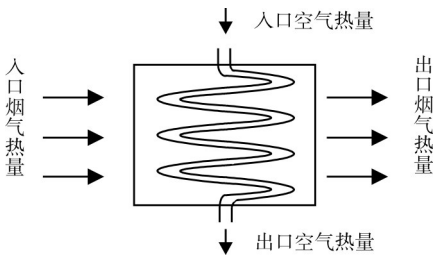


图1 锅炉空气预热器热交换过程

Fig. 1 Heat exchange process of boiler air pre-heater

对于特定的换热系统来说,热效率定义为系统的有效输出热量与输入的总热量之比^[11]。针对电站锅炉空气预热器进行分析,输入总热量为烟气流过空气预热器释放的热量,有效输出热量为空气在空气预热器获得烟气热量后增加的热量。则空气预热器的热效率:单位时间内,空气在空气预热器吸收的热量除以烟气在空气预热器释放的热量。空气预热器的热效率主要反映的是烟气与空气之间的传热效率。空气预热器热效率可按公式(1)计算:

$$\eta = \frac{Q_{\text{gain}}}{Q_{\text{pay}}} \times 100\%$$

(1)

式(1)中: η 为空气预热器的热效率,%; Q_{pay} 为烟气流经空气预热器损失的热量,kJ/s; Q_{gain} 为烟气流经空气预热器增加的热量,kJ/s。

1 空气预热器热效率计算

1.1 烟气释放的热量

对电站锅炉燃煤的组成成分与燃烧过程进行分析,由于燃煤是有机化合物和无机矿物质、水分组成的一种复杂物质,其中的氢元素与空气燃烧会产生水,同时参与燃烧的空气中也含有水分,因此,电站锅炉烟气中会含有水蒸气。即烟气流经空气预热器释放的热量分为干烟气释放的热量 Q_1 和烟气中所含水蒸气释放的热量 Q_2 两部分之和,即式(2):

$$Q_{\text{pay}} = Q_1 + Q_2$$

(2)

1.1.1 干烟气释放的热量 烟气在锅炉空气预热器中的流动可视为等压过程。干烟气释放的热量为空气预热器入口干烟气的热量与空气预热器出口干烟气的热量之差,按式(3)计算:

$$Q_1 = qV_1C_1(t_{\text{in}} - t_{\text{out}})$$

(3)

式(3)中: q 为给煤量,单位为 kg/s; V_1 为每千克燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积, m^3/kg ; t_{in} 、 t_{out} 分别为空气预热器进口、出口烟气温度, $^{\circ}\text{C}$; C_1 为干烟气从 t_{out} 到 t_{in} 的平均定压比热容,kJ/($\text{m}^3 \cdot \text{K}$)。

在国家标准 GB/T 10184—2015 中查取工质平均定压比热容时,标准中附录 E 给出的工质平均定压比热容是从 25 $^{\circ}\text{C}$ 到不同温度下的平均定压比热容,参照文献^[12],可以证明,在计算 C_1 时,应按 $t_{\text{in}} + t_{\text{out}}$ 的值查取工质平均定压比热容。本文以下计算两温度之间的平均定压比热容均按此方法查取。

对燃煤电站锅炉,为了保证煤的完全燃烧,需

要加入过量的空气。空气的过量部分不参与化学反应,全部进入烟气中。因此干烟气体积为煤燃烧产生的理论干烟气体积与未参与燃烧的过量空气体积之和。每千克煤燃烧实际生成的干烟气体积 V_1 按式(4)计算:

$$V_1 = V_{\text{fg,d.th.cr}} + (\alpha_{\text{cr}} - 1)V_{\text{a.d.th.cr}} \quad (4)$$

式(4)中: $V_{\text{fg,d.th.cr}}$ 为修正的理论干烟气体积, m^3/kg ; $V_{\text{a.d.th.cr}}$ 为修正的理论干空气量, m^3/kg ; α_{cr} 为修正的过量空气系数。

每千克煤所需理论空气体积与产生的理论干烟气体积可以根据煤的燃烧方程式推导出。煤的燃烧是煤中可燃成分碳、氢、硫与空气中的氧气发生反应的过程,根据其燃烧所需要的氧气体积,可计算出所需理论空气体积。锅炉在实际燃烧中,煤不可能完全燃烧,飞灰和炉渣中会含有一部分未燃尽的碳,使实际所需干空气量比理论所需干空气量要少,从而也会使实际产生的干烟气体积比理论上少,因此需要对其进行修正。修正的理论干空气量根据实际燃烧掉的碳计算,可按式(5)得出。

$$V_{\text{a.d.th.cr}} = 0.0888\omega_{\text{C.b}} + 0.0333\omega_{\text{S.ar}} + 0.2647\omega_{\text{H.ar}} - 0.0334\omega_{\text{O.ar}} \quad (5)$$

式(5)中: $\omega_{\text{C.b}}$ 为实际燃烧掉的碳占入炉煤的质量分数; $\omega_{\text{S.ar}}$ 、 $\omega_{\text{H.ar}}$ 、 $\omega_{\text{O.ar}}$ 分别为入炉煤(收到基)中元素硫、氢、氧的质量分数。

在进行烟气体积与空气体积理论计算时,需要用到煤的元素分析数据,但元素分析试验项目多、耗时长、操作繁琐,电厂一般只对煤进行工业分析,提供空气干燥基的水分、灰分、挥发份,以及收到基的水分、低位热值等数据。在只有煤的工业分析数据没有具体煤的元素分析数据情况下,为了解决此问题,可以按照文献^[13]中给出的经验公式,由煤的工业分析值推算出煤的元素分析值。

其中,实际燃烧掉的碳占入炉煤的质量分数按式(6)计算:

$$\omega_{\text{C.b}} = \omega_{\text{C.ar}} - \frac{\omega_{\text{as.ar}}}{100} \left(\frac{\omega_{\text{s}}\omega_{\text{C.s}}}{100 - \omega_{\text{C.s}}} + \frac{\omega_{\text{pd}}\omega_{\text{C.pd}}}{100 - \omega_{\text{C.pd}}} + \frac{\omega_{\text{as}}\omega_{\text{C.as}}}{100 - \omega_{\text{C.as}}} \right) \quad (6)$$

式(6)中: $\omega_{\text{C.ar}}$ 为入炉煤(收到基)中元素碳的质量分数; $\omega_{\text{as.ar}}$ 为入炉煤(收到基)中灰分的质量分数; ω_{s} 、 ω_{pd} 、 ω_{as} 分别为炉渣、沉降灰、飞灰占煤总灰量的质量分数; $\omega_{\text{C.s}}$ 、 $\omega_{\text{C.pd}}$ 、 $\omega_{\text{C.as}}$ 分别为炉渣、沉降灰、飞灰中可燃物的质量分数。

修正的理论干空气量对应修正的理论干烟气体

量,修正的理论干烟气体积按式(7)计算:

$$V_{\text{fg,d.th.cr}} = 1.8658 \frac{\omega_{\text{C.b}}}{100} + 0.6989 \frac{\omega_{\text{S.ar}}}{100} + 0.79V_{\text{a.d.th.cr}} + 0.8000 \frac{\omega_{\text{N.ar}}}{100} \quad (7)$$

式(7)中: $\omega_{\text{N.ar}}$ 为入炉煤(收到基)中元素氮的质量分数, %。

实际送入电站锅炉内的干空气量与理论需送入炉内的干空气量之比即为过量空气系数。修正的过量空气系数对应于修正的理论干空气量。对于燃煤电站锅炉,通过测量烟气成分和灰、渣可燃物含量,可计算得到修正的过量空气系数计算式(8):

$$\alpha_{\text{cr}} = \frac{21\varphi_{\text{N}_2,\text{fg,d}}}{21\varphi_{\text{N}_2,\text{fg,d}} - 79\varphi_{\text{O}_2,\text{fg,d}}} \quad (8)$$

式(8)中: $\varphi_{\text{N}_2,\text{fg,d}}$ 、 $\varphi_{\text{O}_2,\text{fg,d}}$ 分别为干烟气中氧气、氮气的体积分数, %;

当 CO 等可燃气体可以忽略不计时,修正的过量空气系数计算式可简化为式(9):

$$\alpha_{\text{cr}} = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2,\text{fg,d}}} \quad (9)$$

煤燃烧产生的烟气是由多种气体成分组成的混合物,烟气中的气体包含二氧化碳、二氧化硫、水蒸汽、氮气、氧气、一氧化碳。其中,干烟气定压比热容可根据烟气中各气体的含量及各气体的定压比热容,按式(10)得出:

$$C_{\text{fg}} = C_{\text{O}_2} \frac{\varphi_{\text{O}_2}}{100} + C_{\text{CO}_2} \frac{\varphi_{\text{CO}_2}}{100} + C_{\text{CO}} \frac{\varphi_{\text{CO}}}{100} + C_{\text{N}_2} \frac{\varphi_{\text{N}_2}}{100} + C_{\text{SO}_2} \frac{\varphi_{\text{SO}_2}}{100} + C_{\text{NO}} \frac{\varphi_{\text{NO}}}{100} \quad (10)$$

式(10)中: C_{O_2} 、 C_{CO_2} 、 C_{CO} 、 C_{N_2} 、 C_{SO_2} 、 C_{NO} 分别为 O_2 、 CO_2 、 CO 、 N_2 、 SO_2 、 NO 的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; φ_{O_2} 、 φ_{CO_2} 、 φ_{CO} 、 φ_{N_2} 、 φ_{SO_2} 、 φ_{NO} 分别为干烟气中 O_2 、 CO_2 、 CO 、 N_2 、 SO_2 、 NO 的体积分数,其和为 100%。

1.1.2 烟气所含水蒸气释放的热量 流经空气预热器烟气中所含水蒸气释放的热量为空气预热器入口烟气中所含水蒸气的热量与空气预热器出口烟气中所含水蒸气的热量之差,按式(11)计算:

$$Q_2 = qV_2C_2(t_{\text{in}} - t_{\text{out}}) \quad (11)$$

式(11)中: C_2 为水蒸气从 t_{out} 到 t_{in} 的平均定压比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; V_2 为每千克煤燃烧生成的空气预热器出口处的烟气中水蒸气的体积, m^3/kg 。

烟气中的水蒸气包含煤中的氢产生的水蒸气、煤中的水分蒸发形成的水蒸气、空气中所带人

的水蒸气、燃油雾化蒸气带入的水蒸气。每千克煤燃烧生成的烟气中水蒸气的体积 V_2 按式(12)计算:

$$V_2=K_1(\frac{9\omega_{H.ar}+\omega_{m.ar}}{100}+K_2\alpha_{cr}V_{a.d.th.cr}h_{a.ab}+\frac{q_{m.st.at}}{q}) \tag{12}$$

式(12)中: $K_1=1.24\text{ m}^3/\text{kg}$; K_2 表示空气的密度,为 $1.293\text{ kg}/\text{m}^3$; $\omega_{H.ar}$ 为入炉煤(收到基)中元素氢的质量分数; $\omega_{m.ar}$ 为入炉煤(收到基)中水分的质量分数; $h_{a.ab}$ 为空气绝对湿度,表示的是每千克干空气中所含水蒸气的质量,其单位为 $\text{kg}(\text{蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$; $q_{m.st.at}$ 为雾化蒸汽质量流量, kg/s 。

在计算空气所带入的水分时,为了简化测量,文献^[14]中,将 1 kg 干空气带入的水蒸气量以 $h_{a.ab}=0.01\text{ kg}(\text{蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$ 替代。但当季节变化时,空气的绝对湿度也会产生变化,因此,建议根据当地季节的不同代入不同的空气绝对湿度值。在春秋季节取 $0.01\text{ kg}(\text{蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$,夏季取 $0.02\text{ kg}(\text{蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$,冬季取 $0.002\text{ kg}(\text{蒸气})/\text{kg}(\text{干空气})$ 较为合理。

1.2 空气吸收的热量

进入锅炉的空气一般包含一次风、二次风,一次风的作用是用来输送加热煤粉,并为煤粉中挥发分燃烧提供氧量,二次风的作用是为煤粉的燃烧提供空气^[15]。因此空气流经空气预热器吸收的热量为一次风、二次风流经空气预热器吸收的热量之和。空气流经空气预热器吸收的热量为空预器出口空气所含热量与空预器进口空气所含热量之差,按式(13)计算:

$$Q_{\text{gain}}=q_1C_{1,1}(t_1-t_{1,0})+q_2C_{2,2}(t_2-t_{2,0}) \tag{13}$$

式(13)中: q_1 、 q_2 分别为流经空气预热器一次风、二次风流量, m^3/s ; t_1 、 $t_{1,0}$ 分别为流经空气预热器一次风出口、进口温度, $^{\circ}\text{C}$; t_2 、 $t_{2,0}$ 分别为流经空气预热器二次风出口、进口温度, $^{\circ}\text{C}$; $C_{1,1}$ 为空气预热器一次风从 $t_{1,0}$ 到 t_1 的平均定压比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$; $C_{2,2}$ 为空气预热器二次风从 $t_{2,0}$ 到 t_2 的平均定压比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 。

2 计算空气预热器的实际热效率

为了计算空预器的实际热效率 η ,于2017年10月24日采集了汉川电厂一台300 MW燃煤机组的空预器的一段运行数据,采集周期为10 s,计算中用到的数据长度为3 600,即10 h的运行数据。在MATLAB语言编程实现上述计算式的基础上,

将采集的数据代入计算,计算结果如图2所示。
对比空气预热器空气的总流量与烟气的流量可以看出其趋势是相同的,烟气的流量大于空气

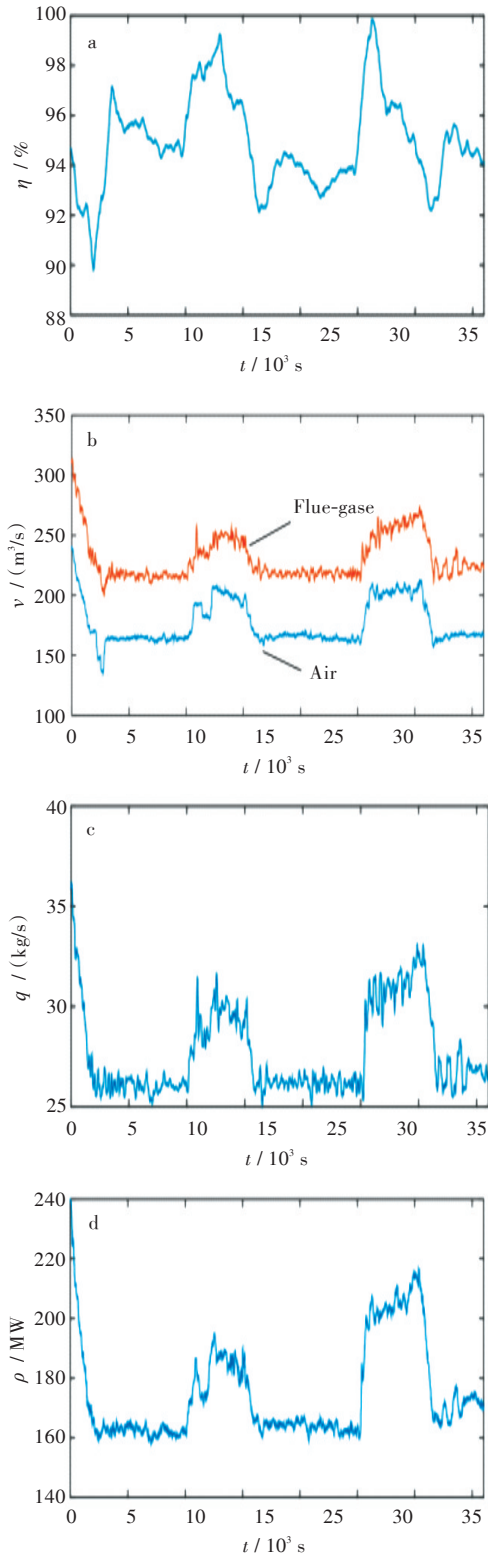


图2 (a)空预器的热效率曲线,(b)烟气和空气的体积流量曲线,(c)给煤量曲线,(d)机组输出功率曲线
Fig. 2 (a)Thermal efficiency curve of air pre-heater, (b)volume flow rate curve of flue-gas and air, (c)coal feed mass flow rate curve ,(d)unit output power curve

的流量,这与实际情况是相符的。机组输出功率 P 的增加导致每小时耗煤量的增加,而耗煤量的增加又导致燃烧所需空气量的增加,从而使产生的烟气量增加,四者的量是相互联系,密不可分的,因此其趋势也是相同的。

从图2中可看出空气预热器热效率分布在90%到100%之间,波动比较大。在计算烟气体积时是根据燃煤的元素分析与燃烧方程式得出的理论烟气体积,并且煤的元素分析过程比较复杂,是当天内的取样值,并非实时值。这些会对热效率的计算结果产生一定的影响。后续可继续探索如何得到更准确的烟气流量方面的研究。对比图中曲线趋势,可以看出当风量与烟气量上升时,热效率也会上升。由于风烟在空气预热器内的流速越大,其换热系数也越大。因此,空气预热器热效率随着风量与烟气量的增大而增大也是合理的。因此说明本文计算空气预热器热效率的方法是可靠的。

3 结 语

空气预热器的热效率是电站锅炉总体热效率的一个重要组成部分,本文根据正平衡法的原理提出的算法能够解决空预器热效率的实时计算或测量问题。利用本算法获取的热效率的实时曲线,机组运行人员能够监视空预器的运行状态,并为相关操作(如空预器吹灰等)提供直观的数据支持。

参考文献:

[1] 郑莆燕,王乔良,朱群志,等. 电站锅炉烟气余热利用方案优化[J]. 热力发电,2017,46(7):5-11.

- [2] 马庆玲,胡洪华. 用热力学方法测量大型锅炉给水泵效率[J]. 中国电力,2000(8):18-22.
- [3] 张瑞卿,杨海瑞,吕俊复,等. 循环流化床锅炉炉膛的传热计算[J]. 动力工程学报,2011,31(4):248-252,262.
- [4] 周少祥,姜媛媛,吴智泉,等. 电厂锅炉单耗分析模型及其应用[J]. 动力工程学报,2012,32(1):59-65.
- [5] 刘家钰. 电站锅炉风机节能诊断方法与技术[J]. 风机技术,2015,57(5):56-63.
- [6] KRISTOL D, MONTULLI L. HTTP Proxy State Management Mechanism Japanese Journal of Clinical Medicine [J].1998, 65 :258-262.
- [7] 李洋,冯立斌. 干法与湿法的高炉渣余热回收热效率与效率分析[J]. 价值工程,2018,37(2):157-159.
- [8] 边乐永. 电站锅炉回转式空气预热器低温腐蚀研究[J]. 锅炉技术,2016,47(4):26-29.
- [9] 陈庆文,漆雅庆,冯超. 热电厂空气预热器节能改造及效果分析[J]. 应用能源技术,2016(8):16-18.
- [10] 刘伟,束继伟,金宏达. 电站锅炉管式空预器积灰堵塞的原因分析及解决措施[J]. 黑龙江电力,2014,36(1):67-70.
- [11] 禹庆明,赵世杰,睢轶,等. 接触式柔性密封在300MW机组空气预热器中的应用[J]. 华北电力技术,2014(11):54-58.
- [12] 曹仲良. 应用GB10184—88《电站锅炉性能试验规程》查取工质平均比热的方法[J]. 热力发电,1999(1):60.
- [13] 李雪亮. 实用简便的锅炉效率计算方法[J]. 华北电力技术,1996(9):21-22,25.
- [14] 杨宏民,石晓峰,候俊凤. 锅炉设备及其系统[M]. 北京:中国电力出版社,2014:42.
- [15] 柳行,姚著,张克伟. 循环流化床锅炉烟风系统控制优化[J]. 热力发电,2017,46(3):126-131.

本文编辑:陈小平