

超超临界燃准东煤机组吹灰系统优化研究

孟强¹, 胡丽娜¹, 程泽宁², 杨志龙³

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆天池能源有限责任公司 准东能源研究院, 新疆 昌吉 831100;
3. 新疆准东特变能源有限责任公司, 新疆 昌吉 831799)

摘要:吹灰是清除受热面积灰结渣的一种有效手段。目前电厂吹灰的频率和时机通常是依靠经验判断,效率低且经济成本高。为改善吹灰方式,以新疆准东地区某台 660 MW 超超临界燃煤电站锅炉为研究对象,基于电厂分布式控制系统(DCS)中的运行数据、受热面管束排布方式及入炉煤的煤质特性,运用热平衡法求出受热面上的灰污系数,并构建在线监测模型,利用该模型优化原有的吹灰系统。结果表明:优化后 1 天内吹灰频率减少 4 次,可为电厂节约 76.26 t 煤,说明此优化模型经济效益十分明显。

关键词:积灰结渣;热平衡法;在线监测;灰污系数;吹灰时长

中图分类号:TK221 文献标识码:B DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.012

[引用本文格式]孟强,胡丽娜,程泽宁,等.超超临界燃准东煤机组吹灰系统优化研究[J].热能动力工程,2023,38(8):95-102. MENG Qiang, HU Li-na, CHENG Ze-ning, et al. Optimization study on soot blowing system for Ultra-supercritical burning Zhundong coal unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 95-102.

Optimization Study on Soot Blowing System for Ultra-supercritical Burning Zhundong Coal Unit

MENG Qiang¹, HU Li-na¹, CHENG Ze-ning², YANG Zhi-long³

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi, China, Post Code: 830046;
2. Zhundong Energy Research Institute, Xinjiang Tianchi Energy Sources Co., Ltd., Changji, China, Post Code: 831100;
3. Xinjiang Zhundong TBEA Energy Co., Ltd., Changji, China, Post Code: 831799)

Abstract: Soot blowing is a very effective means to remove ash and slag from heating surface. At present, the frequency and timing of soot blowing in power plants are mostly judged by experience, which is low in efficiency and high in economic cost. To improve the way of blowing blindly, this paper takes a 660 MW ultra-supercritical coal-fired utility boiler in Xinjiang Zhundong region as the research object, based on the operation data of distributed control system (DCS) of power plant, heating surface tube bundle arrangement way, medium characteristics of coal in furnace, the fouling coefficient of heating surface is calculated by using heat balance method, and online monitoring model is built to optimize the original soot blowing system. Results show that after the optimization, the soot blowing frequency is reduced 4 times in one day, which can save about 76.26 ton of coal for the power plant, indicating that the economic benefit of the optimization model is very obvious.

收稿日期:2022-06-13; 修订日期:2022-07-22

基金项目:庭州青年计划项目(2021QN08);天山青年计划(2020Q012);新疆维吾尔自治区重大专项“超超临界燃用准东煤机组的节能减碳技术研究”(2022A01002-2)

Fund-supported Project: Tingzhou Youth Project (2021QN08); Tianshan Youth Program (2020Q012); Xinjiang Uygur Autonomous Region Major Project "Research on Energy Saving and Carbon Reduction Technology of Ultra-supercritical Burning Zhundong Coal Unit" (2022A01002-2)

作者简介:孟强(1996-),男,新疆大学硕士研究生。

通讯作者:胡丽娜(1986-),女,新疆大学硕士生导师。

Key words: ash slagging, heat balance method, online monitoring, fouling coefficient, soot blowing time

引言

新疆准东煤田的预测储量达 3 900 亿 t,其煤质具有低灰、低硫、中等热值、低变质程度、主要有害物质含量少等特点^[1],且准东煤开采成本低、反应活性好、容易燃尽,是良好的动力和气化用煤^[2]。但是,因为煤灰中含有大量的碱金属,在燃烧过程中形成了低熔点化合物,使受热面的积灰结渣严重。主要体现为:传热热阻和烟道通风阻力增大;锅炉的排烟温度升高、热效率下降;锅炉的受热面腐蚀严重、缩短设备寿命;积灰严重时会使机组负荷降低或停机处理,周期性脱落的积灰会造成锅炉突然熄火^[3-5]。

燃煤电厂锅炉受热面均存在不同程度的积灰结渣,尽管可以通过锅炉本体设计和运行方式的调控减少积灰结渣,但不足以解决问题^[6]。煤质的优劣对受热面的积灰结渣有很大影响。随着煤价的波动,各火力发电企业在保证正常发电的前提下,改烧低价格、低品味的煤种,来获得更大的经济效益,但这会使积灰结渣问题更加严重^[7]。

减少锅炉受热面积灰结渣一直是热点研究方向,并且国内外学者在该方面也取得了极大突破。英国的 BMS International Ltd. 公司制作了高效发电的智能吹灰器控制系统^[8];美国 Westing house 公司制造了一套由优化器和顾问器模块组成的智能软件 Smart Process TM,包括吹灰优化和指导功能^[9-10];加拿大滑铁卢大学采用灰污热流计和清洁热流计直接测量的方法建立锅炉灰污的积灰监测系统^[11];阎维平等人^[12]最早在国内开展相关研究,于青岛电厂 1 号机组搭建的吹灰优化系统可较及时、有效地改善吹灰模式;侯斌等人^[13]提出一种对流受热面积灰实时监测方法,并利用监测结果对吹灰系统进行优化;周克毅等人^[14-15]开发了电厂锅炉吹灰优化管理系统;陆红波等人^[16]通过热平衡法,根据离线数据对锅炉受热面的积灰情况进行了监测。但是,以上方法难以衡量锅炉受热面局部积灰结渣程度,更难以捕捉具体部位积灰结渣程度。同时,利用联合分析,研究人员通过积灰结渣在线监测,制定一套完整

的优化吹灰策略。

本文以准东电厂 660 MW 超超临界锅炉为研究对象,利用热平衡法分析各受热面积灰结渣情况,结合在线监测数据,建立积灰结渣在线监测模型。以此为基础,搭建吹灰成本和收益模型,确定电厂的最佳吹灰时间。本研究成果将运用于准东某电厂实际运行当中,在保证锅炉安全运行的前提下,为该电厂带来巨大的经济效益。

1 模型构建

1.1 原理与方法

监测的基本原理是烟气在流经受热面时放出的热量等于工质在流经受热面时吸收的热量。电厂可以较为精确地测出工质侧的参数,但烟气侧烟温较高,有些部位缺乏温度测点或测量不准确,因此需要利用热平衡关系来推出烟温,并建立在线监测模型得到受热面的灰污系数,进而对受热面的积灰结渣程度进行判断^[17]。在电厂所用煤质以及运行负荷等条件相对稳定的情况下,该在线监测模型能够有效地反映受热面地污染状况^[18]。

1.2 在线监测

1.2.1 实际换热系数 K_{sj} 的计算

工质的对流吸热量:

$$Q_c^{ab} = \frac{D(H_{w,i} - H_{w,o})}{B_{cal}} \quad (1)$$

烟气在流经受热面时所放出的热量:

$$Q_c^{re} = \varphi(H_{g,i} - H_{g,o} + \Delta\alpha \cdot H_l^o) \quad (2)$$

对流传热:

$$Q_c^{ir} = \frac{K_{sj} \cdot \Delta t \cdot A}{B_{cal}} \quad (3)$$

式中: D —所考虑的受热面中的工质流量, kg/s; $H_{g,i}, H_{g,o}$ —烟气进口和出口焓, kJ/kg; $H_{w,i}, H_{w,o}$ —工质出口和进口焓, kJ/kg; φ —保热系数; $\Delta\alpha$ —漏风系数; B_{cal} —燃煤的计算燃料量, kg/s; H_l^0 — $\alpha = 1$ 时漏入空气的焓, kJ/kg; Δt —受热面中流过的工质与受热面上流过的烟气之间进行传热的温差, °C; A —受热面的表面积, m²; Q_c^{ab} —工质在流经受热面时所吸收的热量, kJ/kg; Q_c^{re} —烟气在流经受热面时所放出的热量, kJ/kg; Q_c^{ir} —对流传热量, kJ/kg; K_{sj} —实际

的传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

由电厂的分散控制系统 (DCS) 可以得到 $D, H_{g,o}, H_{w,o}, H_{w,i}, B_{cal}$ 等量, 根据锅炉的热力计算说明书可以得到 $\varphi, \Delta\alpha, H_1^o, H$ 等量。由 $Q_c^{ab} = Q_c^{re} = Q_c^{tr}$ 可以求出受热面进口的烟气焓 $H_{g,i}$, 通过焓温表可以反查出受热面进口烟气的温度, 同时求出传热温差 Δt , 最后得出实际换热系数 K_{sj} 。其中, 传热温差的计算公式为^[19]:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{lar} - \Delta t_{sma}}{\ln \Delta t_{lar} / \Delta t_{sma}} \quad (4)$$

式中: $\Delta t_{sma}, \Delta t_{lar}$ —受热面中有较小温差一端和有较大温差一端的烟气与工质的温差, $^\circ\text{C}$ 。

1.2.2 清洁传热系数 K_{clean} 的计算

清洁传热系数的计算公式为:

$$K_{clean} = \frac{1}{1/\alpha_1 + 1/\alpha_2} \quad (5)$$

式中: α_1, α_2 —烟气对管壁的表面传热系数和管壁对工质的表面传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

对于超超临界锅炉, 因为管壁对工质的表面传热系数 α_2 很大, 因此 $1/\alpha_2$ 可以忽略不计^[20]。此时理想传热系数可以简化:

$$K_{clean} = \alpha_1 \quad (6)$$

烟气对管壁的表面传热系数计算公式:

$$\alpha_1 = \alpha_d + \alpha_f \quad (7)$$

式中: α_d, α_f —烟气对管壁的表面传热系数和辐射表面传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

在受热面计算的过程中, 对于辐射和半辐射受热面均需要考虑辐射放热系数, 而对于尾部烟道的对流受热面, 由于其所受到的辐射热量很小, 基本可以忽略不计, 所以 $\alpha_f = 0$, 故 $\alpha_1 = \alpha_d$ 。

管束顺列布置时和管束错列布置时烟气对管壁的表面传热系数的表达式为:

$$\alpha_d = 0.2 C_z C_s \frac{\lambda}{d} Re^{0.65} Pr^{0.33} \quad (8)$$

$$\alpha'_d = C_z C_s \frac{\lambda}{d} Re^{0.65} Pr^{0.33} \quad (9)$$

式中: C_z, C_s —流动方向管子排数和节距的修正系数; Re, Pr —烟气的雷诺数和普朗特数; d —受热面金属管道的外径, m ; λ —烟气的导热系数, $\text{kW}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

灰污系数 F 的计算为^[21]:

$$F = 1 - K_{sj}/K_{clean} \quad (10)$$

灰污系数 F 的值在 $0 \sim 1$ 之间。灰污系数 $F = 0$ 时, 受热面处于理想的洁净状态; 灰污系数 $F > 0$ 时, 灰污系数 F 值越大, 表示污染越严重^[6]; 灰污系数 F 接近 1 时, 表示污染相当严重。

2 结果与分析

以低温过热器为例, 每隔 1 min 在 DCS 数据库中取 1 次数据, 共取得 1 天内 1 440 组数据进行计算研究。首先, 对模型的可靠性进行验证。其次, 通过计算低温过热器工质侧吸热量以及灰污系数, 并联系负荷变化来分析该受热面积灰结渣情况。

2.1 入口烟温分析

通过在线监测模型计算得到的低温过热器受热面入口烟温和实际电厂测得入口烟温如图 1 所示。由图 1 可知, 通过计算得到的低温过热器入口烟温值与电厂测量值呈相同的变化情况, 同一时间点的数值基本相差不大。在整个过程中, 在线监测得到的入口烟温与电厂实际测量值的误差在 $5\% \sim 10\%$, 说明该模型准确可靠。

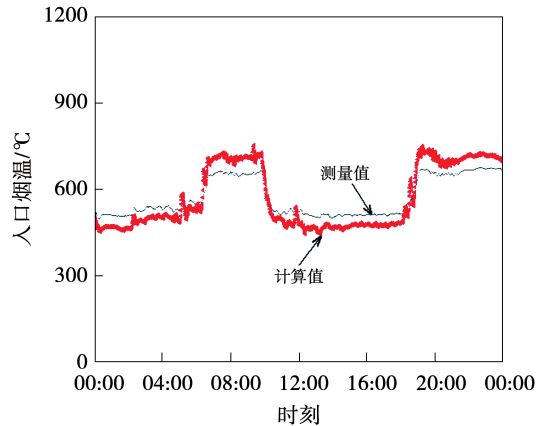


图 1 低温过热器入口烟温的计算值与测量值对比

Fig.1 Comparison of calculated and measured smoke temperatures at inlet of low temperature superheater

2.2 灰污系数的监测及分析

根据在线监测模型基于不同负荷条件下计算得到的低温过热器灰污系数如图 2 所示。

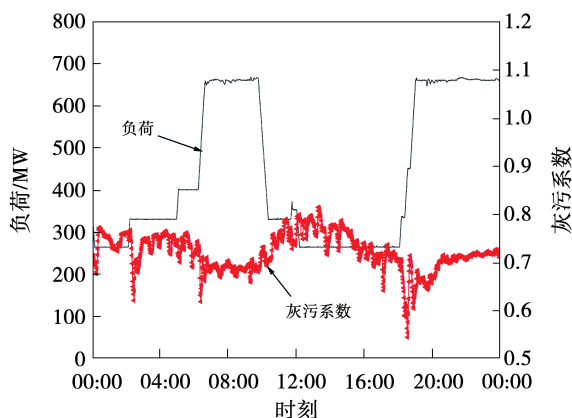


图2 低温过热器灰污系数

Fig. 2 Ash fouling coefficient of low temperature superheater

由图2可知,在5:00~7:00,10:00~12:00和18:00~19:00这些时间段内随着负荷的变化灰污系数也在不断变化。这是因为负荷的变化会引起壁温和工质压力的变化,使管壁侧与工质侧之间产生蓄热量,导致烟气放出的热量有部分用于产生蓄热量,使得原有工质侧和烟气侧的热平衡被打破^[22]。在7:00~10:00和19:00~24:00之间,负荷转为相对稳定状态,此时的灰污系数有小范围的波动。这一现象主要是由受热面上细小灰粒的积累及烟气冲刷使灰粒脱落处于动态平衡造成的^[23]。在12:00~18:00灰污系数相对较大,这是由于在电厂实际运行过程中,机组负荷在50%以下时不可以进行吹灰,否则会造成锅炉燃烧不稳定甚至有灭火的危险。由以上分析可知,在负荷稳定的时候,灰污系数的变化可以准确反映出低温过热器的积灰结渣情况。因此,建立的在线监测模型是准确可靠的。

2.3 工质吸热量分析

对工质吸热量及灰污系数进行分析,如图3所示。由图3可知,整个过程的低温过热器工质侧吸热量与灰污系数呈负相关,符合工质侧吸热量随灰污系数增大而减少的客观规律。在7:00和19:00左右,低温过热器工质侧的吸热量明显增大,之后又在10:00左右显著降低。这是由于在7:00和19:00左右分别进行了吹灰操作,使此时的低温过热器积灰减少,灰污系数减小,工质侧吸热量显著增加。在7:00~10:00,由于负荷相对稳定,灰污系数没有明

显波动,此时的灰污系数和工质侧吸热量也保持相对稳定状态。在10:00之后,负荷显著变化,稳定状态被打破,灰污系数急剧上升,工质侧吸热量急剧下降。由图3可知,通过工质侧吸热量也反映出受热面的积灰结渣情况,对受热面的在线监测起到极大的辅助作用。

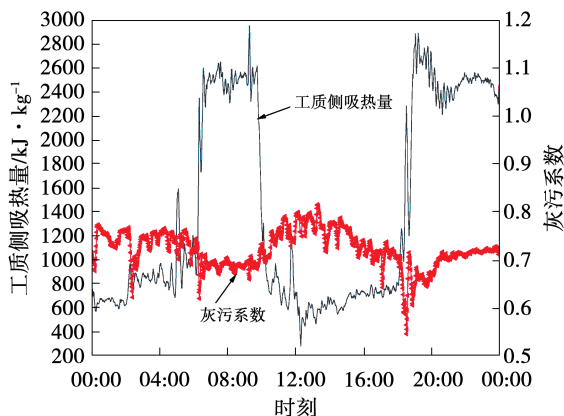


图3 低温过热器工质侧吸热量与灰污系数关系

Fig. 3 Relationship between heat absorption and fouling coefficient of working medium side of low temperature superheater

3 优化方案制定

3.1 优化流程

燃准东煤电厂锅炉积灰严重,每天需要长时间吹灰。为尽可能减少该电厂的吹灰蒸汽消耗量,基于上述在线监测结果,按单位时间内吹灰净收益最大进行优化,优化流程如图4所示。

3.2 确定积灰与吹灰时长

一个完整的吹灰周期包括积灰段和吹灰段^[22]。结合当前理论研究现状与工程实践发现,灰污系数随时间变化呈指数关系^[24],则积灰段和吹灰段灰污系数表示为:

$$F_1 = A - Be^{-Ct} \quad (11)$$

$$F_2 = De^{-Et} \quad (12)$$

式中: F_1, F_2 —积灰段和吹灰段的灰污系数; A, B, C, D, E —常数; t —时间, min。

由于存在积灰越严重、灰污系数越大、受热面传热量越少这一客观规律,利用传热量来计算吹灰净收益。计算吹灰净收益时考虑的损耗主要为蒸汽

损耗,这里折算为吹灰蒸汽的热量损耗。电厂在进行吹灰时,所用蒸汽的参数变化不大,因此可以把该蒸汽的焓值近似为常数^[25]。同时,该电厂吹灰时蒸汽流量较为稳定。从而,建立吹灰净收益最大目标函数,并结合实际加入约束条件,建立数学模型,求得吹灰净收益最大的积灰时长与吹灰时长。

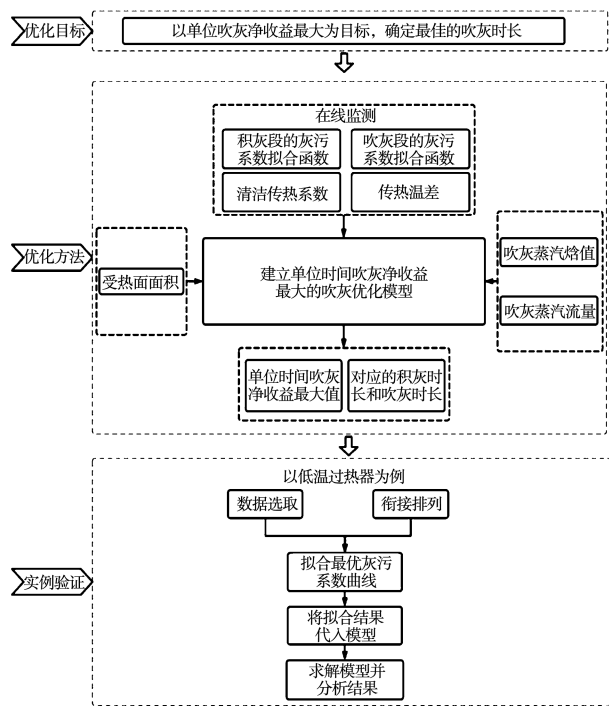


图 4 优化流程
Fig.4 Optimization process

吹灰净收益最大目标函数:

$$\max \Delta Q_1 = \Delta Q / (t_1 + t_2) = \int_{t_1}^{t_1+t_2} (F_1 - F_2) K_{\text{clean}} H \Delta t dt - D_{\text{cb}} \Delta h_{\text{cb}} t_2 / (t_1 + t_2) \tag{13}$$

$$F_{\text{max}} = F_1(t_1) = F_2(t_1) \tag{14}$$

$$F_{\text{min}} = F_1(0) = F_2(t_1 + t_2) \tag{15}$$

式中: ΔQ_1 —单位时间吹灰净收益,kJ/min; ΔQ —吹灰净收益,kJ; t_1 —积灰积累的时长,min; t_2 —吹去积灰的时长,min; D_{cb} —进行吹灰操作时所使用的蒸汽的流量,kg/min; Δh_{cb} —进行吹灰操作时所用蒸汽的焓值,kJ/kg。

通过建立的模型,结合上文内容,以低温过热器为例进行计算分析,利用哈里斯鹰优化算法对目标

函数进行优化计算。

在式(13)的目标函数中,通过在线监测得到的灰污系数是随着时间变化的离散值,因此需要拟合出最优灰污系数曲线方可代入该式求解。为满足工程实际需要,结合式(11)和式(12)所示的函数模型进行函数拟合,呈现出如图 5 所示的指数函数形式。其中,积灰段灰污系数最优排列如图 5(a)所示,数据 1~3 为选取的积灰段灰污系数值。吹灰段灰污系数最优排列如图 5(b)所示,数据 4~6 为选取的吹灰段灰污系数值。

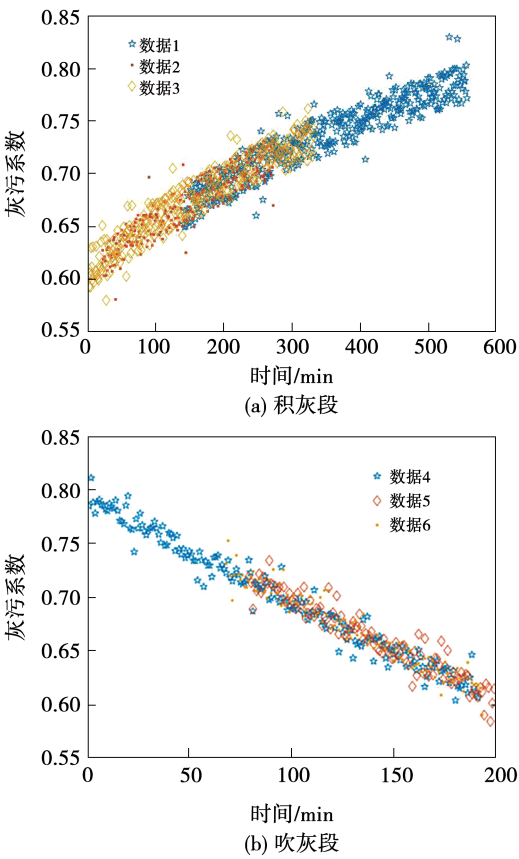


图 5 灰污系数最优排列
Fig.5 Optimal arrangement of fouling coefficient in ash accumulation section

此时,拟合出灰污系数变化曲线,如图 6 所示。

通过以上积灰段和吹灰段灰污系数最优排列对其进行曲线拟合,得到积灰段和吹灰段灰污系数的拟合函数:

$$F_1 = 0.857 - 0.256e^{-0.0022t} \tag{16}$$

$$F_2 = 0.796e^{-0.00132t} \tag{17}$$

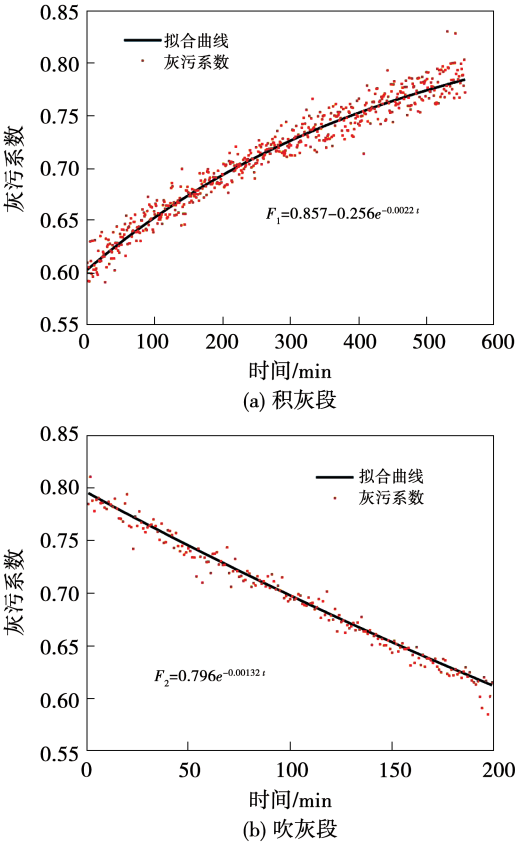


图 6 灰污系数拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of fouling coefficient

最后,为了得到 1 个周期内灰污系数的变化,把两段拟合出来的曲线衔接起来可得到整段最优灰污系数变化曲线如图 7 所示。

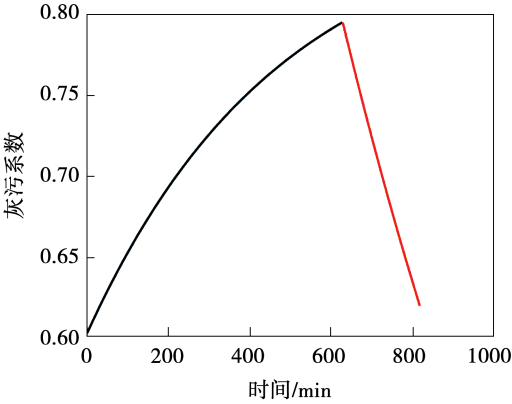


图 7 最优灰污系数变化曲线

Fig.7 Optimal fouling coefficient variation curve

将拟合出的积灰段函数和吹灰段函数代入目标函数中计算得到积灰时间为 533 min,吹灰时间为

217 min,单位时间内吹灰净收益如图 8 所示,其最大值为 25 107.7 kJ/min。

3.3 效益分析

准东某电厂超超临界锅炉低温过热器受热面共布置有 14 台吹灰器,单台吹灰 1 次耗气量为 396 kg,单台吹灰 1 次的吹灰时间为 5.3 min,可求得低温过热器吹灰耗气量为 1 046 kg/min。

根据现场实际可知,该电厂每天吹灰频率为 6 次,吹灰时间为 3 h。由上述优化结果,积灰时长为 533 min,吹灰时长为 217 min,则优化后每天吹灰频率为 2 次,减少吹灰频率 4 次。结合锅炉的设计参数和煤质参数,其中主蒸汽流量为 2 030 t/h,额定煤耗量 305.46 t/h。因此,若按额定煤耗量来将每天减少的蒸汽折算成节煤量,可求得 1 天内节煤 76.26 t。

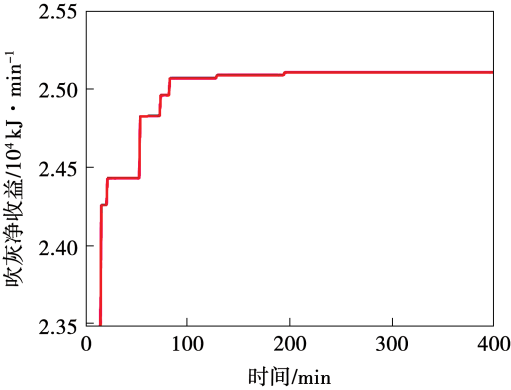


图 8 单位时间内吹灰净收益

Fig.8 Net income per unit time of soot blowing

4 结 论

通过对超超临界燃准东煤机组受热面灰污系数的在线监测及吹灰优化研究后得到以下结论:

(1) 利用热平衡法建立在线监测模型,对比通过在线监测模型计算得到的烟温和实际电厂测得的受热面入口烟温,确保模型的可靠性。并研究了受热面灰污系数、工质侧吸热量、负荷三者之间变化规律。

(2) 建立了吹灰优化模型,该模型借助哈里斯鹰算法得到了单位时间最大的吹灰净收益,1 天内

吹灰频率减少 4 次,可节煤约 76.26 t。

参考文献:

[1] 陈 川,张守玉,刘大海,等. 新疆高钠煤中钠的赋存形态及其对燃烧过程的影响[J]. 燃料化学学报,2013,41(7):832-838.
CHEN Chuan,ZHANG Shou-yu,LIU Da-hai, et al. Existence form of sodium in high sodium coals from Xinjiang and its effect on combustion process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013,41(7):832-838.

[2] 齐晓宾. 高碱低阶煤热化学转化过程中的结渣沾污特性研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所),2018.
QI Xiao-bin. Study on slagging and fouling characteristics of high alkali low-rank coal during thermochemical conversion process [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics),2018.

[3] 郑春晖. 锅炉受热面灰污在线监测及吹灰优化[D]. 大连:大连交通大学,2019.
ZHENG Chun-hui. On-line monitoring and blowing ash optimization of heat transfer surface in coal-fired utility boiler[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University,2019.

[4] 王 斌. 燃煤锅炉灰污监测及吹灰优化研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
WANG Bin. Study on fouling monitoring and sootblowing optimization for coal-fired boilers[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2012.

[5] 祝欣慰. 电站锅炉受热面污染在线监测[D]. 北京:华北电力大学,2012.
ZHU Xin-wei. Fouling and slagging on-line monitoring of heat transfer surface in coal-fired utility boiler[D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.

[6] 阎维平,梁秀俊,周 建,等. 300 MW 燃煤电站锅炉积灰结渣计算机在线监测与优化吹灰[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):84-88.
YAN Wei-ping,LIANG Xiu-jun,ZHOU Jian, et al. On-line monitoring and optimization of ash blowing for 300 MW coal-fired power plant boiler[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(9):84-88.

[7] 喻火明,孙保民,徐 鸿,等. 锅炉受热面积灰在线监测的研究[J]. 工程热物理学报,2006,27(3):534-536.
YU Huo-ming,SUN Bao-min,XU Hong, et al. Research on on-line fouling monitoring of boiler heating surface[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2006,27(3):534-536.

[8] DAVIDSON L. An intelligent approach to boiler sootblowing[J]. Modern Power Systems,2003,23.

[9] JAMES J R,PICHE S,PICKARD F, et al. Sootblowing optimization to improve boiler performance: US 8,498,746 B2[P]. 2013 -

07-30.

[10] NAKONECZNY G J,CONRAD R S,LARSON K A. Boiler performance improvement due to intelligent sootblowing utilizing real-time boiler monitoring [J]. Power-Gen International 2004-Technical Paper,2004.

[11] RHODES E,王学军. 用于褐煤锅炉沾污控制的积灰监测系统[J]. 热力发电译丛,1991(5):9.
RHODES E,WANG Xue-jun. Ash fouling monitoring system for fouling control of lignite boiler[J]. Translation of Thermal Power Generation,1991(5):9.

[12] 陈宝康,阎维平,高正阳,等. 300 MW 燃煤电站锅炉受热面优化吹灰模型的研究与实现[J]. 动力工程学报,2004,24(4):485-489.
CHEN Bao-kang,YAN Wei-ping,GAO Zheng-yang, et al. Research and implementation of sootblowing optimization on 300 MW coal-fired boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2004,24(4):485-489.

[13] 侯 斌,吕子安,武 斌,等. 电站锅炉对流受热面积灰状态的在线监测[J]. 中国电力,2002,35(3):24-27.
HOU Bin,LYU Zi-an,WU Bin, et al. On-line monitoring of fouling on convective heating surface in utility boilers [J]. Electric Power,2002,35(3):24-27.

[14] 周克毅. 锅炉积灰损失与吹灰时间间隔[J]. 东南大学学报(自然科学版),1994,24(S1):57-62.
ZHOU Ke-yi. Ash fouling and time-interval between blows of boiler [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 1994,24(S1):57-62.

[15] 徐啸虎. 燃煤锅炉吹灰优化的研究及系统开发[D]. 南京:东南大学,2003.
XU Xiao-hu. Research and system development of sootblowing optimization for coal-fired boilers[D]. Nanjing:Southeast University,2003.

[16] 陆红波,吉 云,谷 薇,等. 燃煤电站锅炉对流受热面灰污监测的研究[J]. 电力科学与工程,2010,26(2):60-63.
LU Hong-bo,JI Yun,GU Wei, et al. Research on ash fouling monitoring on convective surfaces in coal-fired boiler [J]. Electric Power Science and Engineering,2010,26(2):60-63.

[17] 陆继东,刘定坡,刘 刚,等. 电站锅炉优化吹灰模糊模型的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2005,33(6):35-37.
LU Ji-dong,LIU Ding-po,LIU Gang, et al. Research on fuzzy model for the soot blowing optimization in utility boilers[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2005,33(6):35-37.

[18] 周俊波,陈晓文,高海东,等. 燃煤电站锅炉受热面灰污监测与智能吹灰控制技术[J]. 热力发电,2017,46(12):11-17.
ZHOU Jun-bo,CHEN Xiao-wen,GAO Hai-dong, et al. Fouling

monitoring and intelligent sootblowing control technologies for coal-fired boilers[J]. Thermal Power Generation,2017,46(12): 11-17.

[19] 徐 民. 电站锅炉受热面灰污监测与吹灰优化[D]. 南京: 东南大学,2016.

XU Min. Fouling monitoring and sootblowing optimization on heat surface of utility boiler[D]. Nanjing:Southeast University,2016.

[20] 姚 婧. 超超临界锅炉受热面状态吹灰研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.

YAO Jing. Research on the state of the heated-surface soot blowing in the ultra super-critical boiler[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology,2013.

[21] 刘鑫雅,黄亚继,岳峻峰,等. 600 MW 超临界锅炉尾部对流受热面积灰监测研究[J]. 热科学与技术,2021,20(4): 364-371.

LIU Xin-ya,HUANG Ya-ji,YUE Jun-feng,et al. Research on ash monitoring at the end convection heating area of 600 MW super-critical boiler[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021,20(4):364-371.

[22] 陈宝康,阎维平,朱予东,等. 燃煤电站锅炉对流受热面灰污层增长预测模型的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2004,31(2):32-35.

CHEN Bao-kang,YAN Wei-ping,ZHU Yu-dong,et al. Prediction ash fouling on heat transfer surface of coal fired utility boiler[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2004,31(2):32-35.

[23] 阎维平,朱予东,谭 蓬,等. 变负荷工况下锅炉对流受热面污染的监测[J]. 动力工程学报,2007,27(1):58-61.

YAN Wei-ping,ZHU Yu-dong,TAN Peng,et al. Ash fouling monitoring of boilers convective heat-delivery surface during variable load operation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2007,27(1):58-61.

[24] SHI Yuan-hao,WANG Jing-cheng,LIU Zheng-feng. On-line monitoring of ash fouling and soot-blowing optimization for convective heat exchanger in coal-fired power plant boiler[J]. Applied Thermal Engineering,2015,78:39-50.

[25] PEÑA B,TERUEL E,DÍEZ L I. Towards soot-blowing optimization in superheaters[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2):737-746.

(刘 颖 编辑)

(上接第 94 页)

[10] LEE J,O'NEILL L E,LEE S,et al. Experimental and computational investigation on two-phase flow and heat transfer of highly subcooled flow boiling in vertical upflow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,136:1199-1216.

[11] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development,1966,5(3):322-329.

[12] KANDDLIKKAR S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes[J]. 1990,112(1):219-228.

[13] GUUNGOR K E,WINTERTON R H S. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1986,29(3):351-358.

[14] LI W,WU Z. A general criterion for evaporative heat transfer in micro/mini-channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2010,53(9/10):1967-1976.

[15] YU W,FRANCE D M,WAMBBSGGANSS M W,et al. Two-phase pressure drop,boiling heat transfer,and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube[J]. International Journal of Multiphase Flow,2002,28(6):927-941.

[16] 苏顺玉,黄素逸,王晓墨. 环形狭缝中沸腾传热特性的研究[J]. 工程热物理学报,2004,25(3):442-444.

SU Shun-yu,HUANG Su-yi,WANG Xiao-mo. Investigation on the characteristics of boiling heat transfer through narrow annular channels [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(3):442-444.

[17] BERTTSCH S S,GROLL E A,GARIIMEELLA S V. A composite heat transfer correlation for saturated flow boiling in small channels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2009, 52(7/8):2110-2118.

[18] LIU Z,WIINTERTTON R H S. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli,based on a nucleate pool boiling equation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1991,34(11):2759-2766.

[19] LAZAREK G M,BLACK S H. Evaporative heat transfer,pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(7):945-960.

(刘 颖 编辑)