

# 汽包锅炉炉内结渣的监控及优化吹灰策略

万跃, 晏海能

(江苏淮阴发电有限责任公司, 江苏 淮安 223002)

**摘要:**在介绍炉内结渣影响因素的基础上,以优化炉内吹灰为目标,比较分析了汽包锅炉炉内结渣或吹灰的多种监测方法,针对某300 MW汽包锅炉,提出采用低温过热器出口蒸汽温度作为监测炉内结渣的主要参数,以此确定炉内吹灰条件,并利用现场数据说明了该方法的有效性。

**关键词:**汽包锅炉;炉内;结渣;吹灰

**中图分类号:**TK227

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2014)05-0080-02

目前,煤碳供应形势越来越紧张,各火力发电厂为提高经济效益,在生产运行中很难燃用设计煤种,甚至无法燃用校核煤种,掺煤混烧已成为火电厂的必然选择。很多火电厂燃用过高硫分、低灰熔点的劣质煤,这些煤种对炉膛结渣有较大的影响,甚至可能因炉内结渣严重而引起停炉的事故。因此,在燃用劣质煤时,加强对炉内结渣的监控和预防就显得尤为重要,结合实例,对燃用劣质煤时的炉内结渣情况进行分析和研究,可供同类型电厂参考。

## 1 炉内结渣的特性

炉内结渣指在受热面上熔化了了的灰沉积物的积聚,多发生在炉内辐射受热面上。大型煤粉锅炉炉内煤粉在0.03~0.05 s的时间内即被加热到1600℃<sup>[1]</sup>以上,因此,煤粉炉内穿过炉膛火焰的全部灰粒都是液化的,如果处于熔融或半熔融状态的灰到达受热面上,则很容易粘附在受热面上。由于扩散作用,在管子外表面形成薄的、白色的、很细的灰沉积层。该层厚度一般为0.2~0.5 mm,具有良好的绝热性能,不仅引起炉膛温度的升高,而且还造成了受热面管子外表温度比原来高很多,使受热面管表面大量结渣成为可能。随着表面烧结层厚度的增加,积灰表面温度也升高,当积灰表面的温度升高到接近烟气温度的时候,大量熔融的灰粒与积灰层相碰撞,结合成坚实的积灰,灰层进一步变厚,灰温升高,导致恶性循环,使灰层表面形成熔融相,可能形成液态渣层。

炉内结渣导致炉内传热恶化,炉内辐射传热量减少,炉膛出口烟温升高,对流受热面区域热负荷增加,可能造成受热面管壁超温,同时造成过热器、再热器减温水用量大幅增加,排烟温度也随之升高,给锅炉的安全、经济运行带来较大的影响。目前,一般电厂经常使用的方法是加强炉内吹灰,但强化吹灰将带来如下问题:

(1) 炉膛水冷壁吹灰次数过多,造成汽温偏低。为了提高汽温,增加了对水平烟道末级过热器和末级再热器管屏处的吹灰次数,这样不仅浪费汽源,而且也增加了对管子的冲蚀。

(2) 由于吹灰频繁,炉膛水冷壁、过热蒸汽管、再热蒸汽管管壁过于清洁,管子表面缺乏调节换热的“灰层”,热量分配容易失衡,导致过热汽温与再热汽温调节困难,对煤种的适应性变差。

(3) 不利于调整过热蒸汽、再热蒸汽两侧汽温:出现两侧汽温偏差时,调整的手段和幅度非常有限,常用的只能是将温度较高一侧的减温水或事故喷水开大,来控制受热面的管壁不超温,将造成减温水或事故喷水量增加,特别是再热器事故喷水量的增加,使机组煤耗增加较多,机组的效率降低。

根据西安热工研究所的研究结果,在GB7562—87中,以煤的软化温度为基本指标,以煤的低位发热量为辅助指标。对于热值 $Q_{ar,net} > 12\ 560$  kJ/kg的煤种,软化温度 $> 1350$ ℃,属于不结渣煤种,如果软化温度 $\leq 1350$ ℃则属于结渣煤种。哈尔滨电站设备成套设计研究院对我国290种动力用煤的灰渣特性进行分析,并用三段最优分割来确定,以还原性气氛下软化温度作为判别依据:软化温度 $> 1390$ ℃ 轻微结渣;软化温度 $= 1260 \sim 1390$ ℃ 中等结渣;软化温度 $< 1260$ ℃ 严重结渣。

## 2 炉内结渣的监控

炉内结渣的监视目前还是依靠运行人员的观察。已有部分科研单位对炉内结渣自动监督进行开发研究,吹灰器程序控制系统已得到普遍应用,主要是根据炉内结渣时运行参数的变化,作为炉内结渣的监控手段。

### 2.1 根据炉膛出口烟气温度进行监控

根据传热学原理,炉内辐射传热基本公式为:

$$Q_f = \alpha_1 \sigma_0 A_f (T_h^4 - T_w^4) / B_j \quad (1)$$

式中: $Q_f$ 为相对1 kg燃料炉膛辐射吸热量,kJ/kg; $\alpha_1$ 为炉膛系统黑度; $\sigma_0$ 为绝对黑体辐射常数,取 $2.04 \times$

$10^{-7} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_h$  为火焰平均有效温度, K;  $T_w$  为水冷壁积灰污染层表面温度, K;  $A_f$  为炉膛有效辐射受热面积,  $\text{m}^2$ ;  $B_j$  为计算燃料消耗量,  $\text{kg}/\text{h}$ 。

由分析可知,随着水冷壁表面积灰的增加,水冷壁积灰污染层表面温度必然升高,使得炉膛辐射吸热量减少。另外,根据烟气在炉膛内的放热公式<sup>[2]</sup>为:

$$Q_f = \varphi V C_p (T_a - T_1'') \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为考虑散热损失的保温系数;  $V$  为  $1 \text{ kg}$  燃料的烟气体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $C_p$  为炉内烟气的比热容,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ;  $T_a$  为理论燃烧温度, K;  $T_1''$  为炉膛出口烟气温度, K。由此可知,当炉内结渣严重时,  $T_1''$  会升高。

但在实际应用中,用炉膛出口烟温作为炉内结渣的监控参数仍存在一定困难,主要原因:一是高温烟气的测量问题,采用水冷抽气热偶测量精度差,不能作为长期连续测量的手段,所以用高温过热器或高再热器后的烟气温度来替代;二是大型锅炉炉膛出口烟道截面积大,烟气温度偏差很大,难以找到具有代表性的测量点。三是炉膛出口烟温受运行工况如磨组变化及一、二次风的调整等影响较大,并不单纯反映炉内结渣情况,因此难以确定某一定值来严格界定炉膛是否结渣。

## 2.2 采用蒸汽侧吸热量计算炉膛出口烟气温度

华北电力大学提出,通锅炉汽水侧参数计算出炉膛出口烟温。对于汽包锅炉,当煤种变化不大时,可用省煤器出口联箱水温的测量和布置在炉膛内过热器、再热器吸热量的测量,替代炉膛出口烟温的测量<sup>[3]</sup>。

由式(2),只要计算出炉膛放热量,即可以计算出炉膛出口烟温:

$$T_1'' = T_a - Q_f / (\varphi V C_p) - 273 \quad (3)$$

因此,问题转化为炉膛辐射传热量  $Q_f$  的计算:

$$Q_f = (Q_{sc} + Q_{fg} + Q_{fz} + Q_{yc} - Q_{gr} - Q_{sm}) / B_j \quad (4)$$

式中:  $Q_{sc}$  为锅炉部分输出热量,  $\text{kJ}/\text{h}$ ;  $Q_{fg}$  为炉内辐射式或半辐射式过热器蒸汽吸热量之和,  $\text{kJ}/\text{h}$ ;  $Q_{fz}$  为炉内辐射式或半辐射式再热器蒸汽吸热量之和,  $\text{kJ}/\text{h}$ ;  $Q_{yc}$  为炉膛出口烟窗投射出去的热量,  $\text{kJ}/\text{h}$ ;  $Q_{gr}$  为工质过热过程吸收的热量,  $\text{kJ}/\text{h}$ ;  $Q_{sm}$  为省煤器内工质吸收的热量,  $\text{kJ}/\text{h}$ 。此方法虽然看似复杂,但由于蒸汽侧温度、压力等测点较为准确,华北电力大学经过多次传热试验证实,此方法测量精度更高。

## 3 选用低温过热器出口蒸汽温度监控炉内结渣

从理论上讲,炉内结渣必然造成水冷壁吸热量减少,因此造成炉膛出口烟温升高,但是炉膛出口烟温受运行工况、煤种等影响较大,即炉膛出口烟温升高,不一定是炉膛结渣引起的。因此,笔者通过跟踪锅炉运行

参数变化,提出用低温过热器出口蒸汽温度的变化来表示炉膛辐射吸热量的变化,反映炉内结渣情况。不选取高温过热器或屏式过热器的原因是:炉膛结渣的结果是使炉膛蒸发量变小,且炉膛出口烟温升高,这两者都使过热器汽温必然升高。但由于屏式过热器和高温过热器出口的蒸汽经过喷水减温,其温度值受喷水量的影响较大,不能作为比较依据。

运行工况稳定时,炉内结渣使炉膛蒸发量减少,流过低温过热器的蒸汽量减少,由于低温过热器的吸热主要取决于烟气侧,因此,可将低温过热器的吸热量看作不变,则低温过热器出口蒸汽温度必然升高。另一方面,炉内结渣还造成低温过热器处烟气温度升高,这也使低温过热器出口汽温上升。

在实际使用过程中,以某火电厂 HG-1036/17.5-YM36 锅炉为例,在燃用正常煤种时,低温过热器出口汽温为  $390 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在燃用高硫煤时,硫份  $S_{t,ad}$  远远超过设计煤种的  $0.72\%$ ,达到  $1.49\%$ ,造成炉膛结渣。为防止炉内结渣严重,通过炉膛吹扫可有效地减少炉膛结渣,提高炉膛运行的安全性和经济性。以该厂燃用高硫煤时的一次炉膛吹灰为例,入炉煤工业分析成分见表 1,炉膛吹灰前后的参数见表 2。

表 1 入炉煤工业分析成分

成分	数值
全水 $M_t/\%$	16.6
内水 $M_{ad}/\%$	4.28
空干灰 $A_{ad}/\%$	16.82
挥发份 $V_{ad}/\%$	33.41
固定碳 $FC_{ad}/\%$	45.49
全硫 $S_{t,ad}/\%$	1.49
低位热值 $Q_{net,ar}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	20.341

表 2 炉膛吹灰前后的参数

参数	吹灰前	吹灰后
低过出口汽温 $/^\circ\text{C}$	414.4	403.9
过热器减温水量 $/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	40.2	10.4
再热喷水量 $/(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$	10.9	4.2
过汽温 $/^\circ\text{C}$	541.5	538.5

从表中可以看出,在炉膛吹灰前,1 h 内的低过出口汽温平均为  $414.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,吹灰后,低过出口汽温下降到  $403.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,同时,过热器减温水也从  $40.2 \text{ t}/\text{h}$  下降到  $10.4 \text{ t}/\text{h}$ ,再热器喷水量从  $10.9 \text{ t}/\text{h}$  下降到  $4.2 \text{ t}/\text{h}$ ,锅炉运行的经济性明显提高。

针对不同机组的不同的煤种,在实际运行中,可通过试验得出最佳吹灰标准,当运行工况发生变化时,只要及时考虑上述情况,合理选择蒸汽侧(低温过热器出口温度)的参数,就能达到优化吹灰的目的,提高锅炉的安全、经济运行性能。

## 参考文献:

- [1] 辛耀中. 电力二次系统安全评估[C]// 信息安全风险评估研讨会, 北京, 2004: 15-21.
- [2] 段 斌, 王 健. 变电站自动化信息交换安全认证体系[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 55-59.
- [3] 刘 念, 张建华, 段 斌, 等. 网络环境下变电站自动化通信系统脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 28-33.
- [4] SU S, CHAN W L, LI K K, et al. Context Information-based Cyber Security Defense of Protection System[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2007, 22(3): 1477-1481.
- [5] TEN C W, GOVINDARASU M, LIU C C. Cybersecurity for Critical Infrastructures: Attack and Defense Modeling [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2010, 40(4): 853-865.
- [6] TEN C W, LIU C C, GOVINDARASU M. Vulnerability Assessment of Cybersecurity for SCADA Systems [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2008, 23(4): 1836-1846.
- [7] 胡 炎, 辛耀中, 韩英铎. 二次系统安全体系结构化设计方法[J]. 电力系统自动化, 20003, 27(21): 63-67.
- [8] 陈思勤. 华能上海石洞口第二电厂实时系统安全分析及防护对策[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 72-75.
- [9] NORDSTROM L. Assessment of Information Security Levels in Power Communication Systems Using Evidential Reasoning [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2009, 24(3): 1384-1391.
- [10] LIU Y, NING P, REITER MICHAEL K. False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids [J]. ACM Transactions on Information and System Security, 2011, 14(1): 21-32.
- [11] KOSUT O, JIA L Y, THOMAS ROBERT J. Malicious Data Attacks on Smart Grid State Estimation: Attack Strategies and Countermeasures[C]// 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010: 220-225.

## 作者简介

王 燕(1965), 女, 江苏镇江人, 工程师, 从事电网投资管理、电网信息安全工作。

## A Design of Gaming Theory Based Defense System for Power System Cyber-Security

WANG Yan

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Along with the fast development of smart grid, more and more electronic devices and communication systems have been applied in power system. Therefore, cyber security becomes a big challenge faced by all power companies. This paper first introduces the current status of cyber security in power companies. Then the cyber security requirements set by various countries are summarized. Following that, the researches on power system cyber security are reviewed. Based on that, a cyber-security intelligent defense system is proposed which provides system operator a tool to actively fight with the hackers. Finally, the framework and the implementation methodologies of this defense system are provided.

**Key words:** cyber-security; stackelberg competition; stochastic game

(上接第 69 页)

## 4 结束语

目前, 对炉膛结渣的监控还没有很好的自动监控手段, 运行人员通过运行中参数的变化, 能及时有效地判断炉膛是否结渣。对于汽包锅炉, 可以采用低温过热器出口温度作为炉膛结渣的判据, 通过对低温过热器出口温度的分析, 合理确定吹灰时机, 及时清除炉膛结渣, 提高运行的安全性和经济性。

## 参考文献:

- [1] 岑可法, 周 昊, 池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 38.
- [2] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1986: 52.
- [3] 姚文达, 姜 凡. 火电厂锅炉运行及事故处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 46.

## 作者简介:

万 跃(1958), 男, 江苏淮安人, 从事电力生产管理工作;  
晏海能(1973), 男, 江苏淮安人, 高级工程师, 从事火力发电技术管理工作。

## Sootblowing Strategy Optimization and Monitoring of Slagging in Drum Boiler Furnace

WAN Yue, YAN Haineng

(Jiangsu Huaiyin Power Generation Co. Ltd., Huaian 223002, China)

**Abstract:** In this paper, firstly, the main factors influencing the slagging issues within boiler furnace are introduced. Then, the widely adopted methods for monitoring the slagging condition and sootblowing problems are analyzed. Focusing on one 300 MW drum boiler, we proposed a method employing the outlet steam temperature of the low-temperature superheater as the main monitoring parameter for the slagging condition within the furnace. The field test results strongly supported the validity of the proposed method.

**Key words:** drum boiler; boiler furnace; slagging; sootblowing