

# 1 000 MW 超超临界锅炉折焰角斜坡积灰与塌灰计算分析

高毅<sup>1</sup>,姚凯<sup>1</sup>,张海丹<sup>2</sup>,刘丹<sup>3</sup>,杨冬<sup>3</sup>

(1. 浙江浙能台州第二发电有限责任公司,浙江台州 317109;2. 浙江浙能技术研究院有限公司,浙江杭州 311121;

3. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室,陕西西安 710049)

**摘要:**超超临界燃煤发电技术是煤炭清洁利用的重要途径。超超临界锅炉中Ⅱ型锅炉炉膛出口与水平烟道连接处的折焰角部位由于存在回流区极易形成积灰,严重影响锅炉安全运行。通过对超超临界燃煤锅炉折焰角积灰进行机理分析,包括灰粒与沉积层之间的黏结力和破坏灰粒沉积的力,建立折焰角积灰数学模型和塌灰预判模型,从而给出是否发生塌灰现象的预判结果,为电站安全运行及维护提供指导方案。该积灰与塌灰预判模型利用煤质相关参数、锅炉设计参数以及运行数据,得到烟气中煤灰颗粒的运动速度、深入沉积层深度和表面张力大小,从而定量计算出灰粒在折焰角斜面单位面积上的黏结力和灰粒对沉积层的冲击力,并根据单位面积上的黏结力、重力以及摩擦力之间的平衡关系得到折焰角部位理论最大积灰高度和实际最大积灰高度。当理论最大积灰高度大于实际最大积灰高度时,沉积层的摩擦力和黏结力大于重力沿折焰角斜面的分力,折焰角斜坡灰不会发生塌灰现象,反之,当理论最大积灰高度小于实际最大积灰高度时,则会发生塌灰现象。针对浙江浙能台州第二发电有限责任公司1 000 MW超超临界Ⅱ型布置煤粉锅炉折焰角积灰与塌灰特性进行了计算分析,结果表明,当炉膛出口烟温为1 035 ℃,燃用设计煤种时,折焰角部位实际积灰高度为2.48 m,小于重力平衡高度6.69 m,该锅炉折焰角部位不会发生塌灰现象,折焰角设计及运行合理可行,超超临界锅炉折焰角斜坡积灰与塌灰预判模型对锅炉设计及优化运行具有参考价值。

**关键词:**Ⅱ型煤粉锅炉;折焰角;积灰;塌灰;预判模型

中图分类号:TM621

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)02-0114-06

## Calculation and analysis of ash deposition and collapse at the furnace arch of 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired boiler

GAO Yi<sup>1</sup>, YAO Kai<sup>1</sup>, ZHANG Haidan<sup>2</sup>, LIU Dan<sup>3</sup>, YANG Dong<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Zheneng Taizhou Second Electric Power Generation Co., Ltd., Taizhou 317109, China; 2. Zhejiang Energy Group R&D Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 3. State Key Laboratory of Multiphase flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Ultra-supercritical coal-fired power generation technology is an important way of coal clean utilization. Among the ultra-supercritical boilers, the furnace arch at the joint between the furnace outlet of the Ⅱ type boiler and the horizontal flue is easy to form ash deposition due to the existence of the recirculation zone, which seriously affects the safe operation of the boiler. Through the mechanism analysis of the ash deposition of the furnace arch in the ultra-supercritical coal-fired boiler, including the adhesion force between the ash particle and the sediment and the force of destructing ash deposition the mathematical model of ash deposition of the furnace arch and the pre-judging model of ash collapse were established to give a prediction result of whether the ash collapse would occur, which could provide a guidance plan for the safe operation and maintenance of the power station. The ash deposition and ash collapse pre-judging model obtained the moving speed of the coal ash particles in the flue gas, the depth of the sediment layer and the surface tension based on adopting the coal

收稿日期:2019-01-17;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19011701

基金项目:浙江省能源集团有限公司科技资助项目(ZNKJ-2017-075)

作者简介:高毅(1969—),男,浙江台州人,高级工程师,主要从事火力发电厂设备管理及检修工作。E-mail:2548907079@qq.com

引用格式:高毅,姚凯,张海丹,等.1 000 MW超超临界锅炉折焰角斜坡积灰与塌灰计算分析[J].洁净煤技术,2019,25(2):114-119.

GAO Yi, YAO Kai, ZHANG Haidan, et al. Calculation and analysis of ash deposition and collapse at the furnace arch of 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 114-119.



移动阅读

quality parameters, boiler design parameters and operating data, so as to quantitatively calculate the adhesion force of ash particles in the per unit area of inclined plane of the furnace arch and the impact of the ash particles on sediments. The theoretical maximum ash deposition height and the actual maximum ash deposition height at the furnace arch position were obtained according to the equilibrium relationship among the adhesion force, gravity and frictional force in per unit area. When the theoretical maximum ash deposition height is greater than the actual maximum ash deposition height, the friction and adhesion force of the sediment layer are greater than the component force of gravity along the inclined plane of the furnace arch, and the ash deposition of the furnace arch does not collapse, otherwise, when the maximum ash deposition height is less than the actual maximum ash deposition height, ash collapse will occur. For the 1 000 MW ultra-supercritical  $\Pi$ -type coal-fired boiler of Second Electric Power Generation Co., Ltd. Taizhou Zhejiang province, the characteristics of the ash deposition and ash collapse at the furnace arch were calculated and analyzed. The results show that, when the furnace outlet temperature is 1 035 °C and the design coal is burned, the actual ash height at furnace arch is 2.48 m, which is less than the gravity balance height of 6.69 m. The furnace arch of the boiler does not occur ash collapse, and the design and operation of the furnace arch is reasonable and feasible. The pre-judgment model of ash deposition and ash collapse at the furnace arch of the ultra-supercritical boiler has certain reference value for boiler design and optimization operation.

**Key words:**  $\Pi$ -type coal-fired boiler; furnace arch; ashde position; ash collapse; pre-judgment model

## 0 引言

目前我国能源消费结构中,煤电仍占主导地位,为消除锅炉能耗严重的问题,超超临界煤粉锅炉以其较高的燃煤利用率和优良的环保性能已逐步推广投运,成为我国大力建设的主要机组<sup>[1-3]</sup>。 $\Pi$ 型和塔式布置形式是大容量机组锅炉的 2 种主要布置形式。其中, $\Pi$ 型布置锅炉分为前炉膛、水平烟道和尾部烟井 3 部分,在炉膛出口与水平烟道连接处设计有折焰角,该结构有利于火焰充满整个炉膛,提高火焰分布均匀性,从而降低高温烟气对出口受热面的冲刷程度,同时便于在水平烟道布置更多的对流受热面,提高工质吸热比重。但折焰角下部的烟气流经该区域时会发生急剧转向,从而形成回流区,由于回流区压力及烟气流速明显低于其他主流区,使得烟气携带的飞灰经过该区域时,质量大的飞灰从主流区被分离出来沉积在折焰角斜坡上<sup>[4]</sup>。折焰角的结构特性加之我国煤种变化范围宽,煤种品味高低不等,动力用煤大多为低品位劣质煤,使得锅炉折焰角成为极易积灰的地方<sup>[5-6]</sup>。因此,研究  $\Pi$  型煤粉锅炉折焰角积灰和塌灰问题对于提高锅炉安全运行具有重大意义。近年来,国内外对煤粉锅炉积灰监测已进行大量研究,已有较完整的积灰监测和吹灰系统运用于多数电厂<sup>[7]</sup>。对于煤粉锅炉积灰监测的研究,一类是针对锅炉炉膛积灰结渣问题,另一类是针对对流受热面积灰问题。但对于折焰角等特殊部位的积灰监测及塌灰预判的研究较少。胡洪伟<sup>[8]</sup>梳理了锅炉受热面多种灰沉积模型、运输模型以及颗粒受力模型;陈一平等<sup>[5]</sup>指出折焰角存在回流区、角度小、烟气流速低以及存在吹灰盲区是造成折焰角积灰的主要因素;卢红书<sup>[9]</sup>、麦勇军等<sup>[10]</sup>、兰

建辉<sup>[11]</sup>、陆雪强<sup>[12]</sup>均针对特定锅炉进行了折焰角积灰原因以及塌灰危害分析并提出治理方案。现有文献对超超临界  $\Pi$  型布置煤粉锅炉折焰角塌灰现象缺乏灰粒受力分析和理论研究。本文从积灰的颗粒沉降机理出发,对折焰角积灰部位建立灰堆流动特性数学模型,利用电厂提供的煤质相关参数、锅炉结构和运行数据对折焰角积灰和塌灰的风险进行预判,为电厂的安全运行和维护提供实用可靠的指导方案。

## 1 折焰角积灰机理

### 1.1 灰粒黏结力

在折焰角壁面上沉积的灰粒与沉积层主体间存在黏结力  $F$ , 其包括范德华力、表面张力、静电力以及热泳力,其中以范德华力为主。

#### 1) 范德华力

范德华力主要指弱电吸引力,在锅炉对流受热面上具体指沉积在锅炉受热面上的灰粒与沉积层主体之间的范德华力。沉积在折焰角斜坡上的灰粒与折焰角壁面间的范德华力可看作球形颗粒与平面之间的范德华力,当半径  $r$  的球与平面相距  $x$  时,2 者之间的范德华力为

$$F_f = Hr/6x^2 \quad (1)$$

式中, $H$  为试验常值, $H=10^{-20}$  J。

#### 2) 表面张力

表面张力存在于 2 种物质的交界面处,通常为液液界面、气液界面 2 种物质分子间有相互吸引力的力。在固固两相交界面上,表面张力表现为固体颗粒在表面上的黏结力大小。本文采用改进的 Butler 计算模型<sup>[13]</sup>计算表面张力,该模型假设溶液表面相内组分与体相内组分在热力学上达到平衡,由此推

出表面张力与热力学关系如下:

$$\sigma = \sigma_i^{\text{pure}} + \frac{RT_k}{A_i} \ln \frac{a_i^{\text{surf}}}{a_i^{\text{Bulk}}} \quad (2)$$

式中,  $\sigma$  为灰粒的表面张力, N/m;  $\sigma_i^{\text{pure}}$  为纯物质  $i$  的表面张力, N/m;  $R$  为摩尔气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T_k$  为绝对温度, K;  $A_i$  为组元  $i$  摩尔表面面积,  $\text{m}^2/\text{mol}$ ;  $a_i^{\text{surf}}$  为组元  $i$  在表面相的活度;  $a_i^{\text{Bulk}}$  为组元  $i$  在体相的活度。

### 3) 静电力

静电力是使带有电荷的灰粒相互吸引的力,但在锅炉折焰角斜坡处的沉积层由于受温度影响,使得受静电力造成堆积的可能性较小,且静电力堆积灰强度较小、较为松散,折焰角处积灰强度大。因此静电力不作为折焰角斜坡积灰的主要作用力。

### 4) 热泳力

热泳力是当沉积层中存在温度梯度时表面灰粒受温度梯度的影响而运动的力。但是沉积层中灰粒颗粒较大,受力强度较小,因此热泳力一般不作为折焰角斜坡积灰的主要作用力。

## 1.2 破坏灰粒沉积的力

### 1) 灰粒的重力

当沉积层质量达到临界值时,自重便可促使沉积层离开壁面。

### 2) 气流的黏性剪切力

烟气在绕流折焰角流动时,会对原有的沉积层产生黏性剪切力,并将灰粒冲走,气流对沉积层灰粒的黏性剪切力为

$$F_g = \mu \frac{dv}{dy} A \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为烟气黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\frac{dv}{dy}$  为法向速度梯度;  $A$  为灰粒在壁面的投影面积,  $\text{m}^2$ 。

### 3) 灰粒对沉积层的冲击力

炉内灰粒对壁面的冲击情况十分复杂。本文利用碰撞力公式<sup>[9]</sup>进行计算,即

$$F_c = v(2\pi r m_p \sigma)^{1/2} \quad (4)$$

式中,  $v$  为灰粒速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $m_p$  为单个颗粒质量,  $\text{kg}$ 。

## 2 折焰角积灰与塌灰预判模型

### 2.1 积灰数学模型

折焰角壁面处的沉积层,一方面由于灰粒的不断黏附而逐渐加厚,另一方面由于灰粒的惯性而产生冲蚀,使得沉积层有减薄趋势。同时沉积层达到一定厚度时,在其自身重力作用下,会产生脱落现象。因此沉积层将在上述因素共同影响下达到一定

的平衡状态。

假设灰粒和壁面上灰粒发生碰撞时的情形如图1所示( $m_p$ 、 $m_{p1}$ 、 $m_{p2}$  分别为单个灰粒质量,  $F_i$  为颗粒间内力,  $F$  为黏结力,  $v_p$  为颗粒撞击速度)。一方面产生内力  $F_i$ , 另一方面壁面上灰粒与沉积层主体间存在黏结力  $F$ , 黏结力包含了折焰角积灰机理中所述的范德华力、表面张力、静电力和热泳力4种灰粒黏结力。

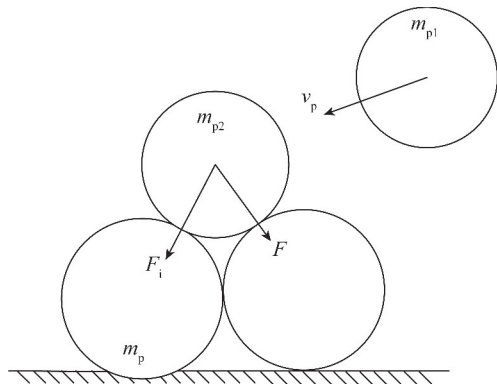


图1 灰粒黏结力

Fig. 1 Adhesion force of ash particles

首先根据灰粒冲撞沉积层的情况计算得到灰粒在沉积层内受到的黏结力。当灰粒冲撞沉积层时,灰粒深入沉积层的深度  $S$  的计算公式<sup>[14]</sup>为

$$S = \frac{2vr^2 \rho \sin \theta}{9\mu} \quad (5)$$

式中,  $S$  为灰粒深入沉积层深度,  $\text{m}$ ;  $\rho$  为灰粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\theta$  为冲击角度即折焰角倾角, ( $^\circ$ )。

对于灰粒速度  $v$ , 采取烟气流速的平均值, 即

$$V_k = 0.0889(C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}) + 0.265H_{\text{ar}} - 0.0333O_{\text{ar}} \quad (6)$$

$$V(\text{RO}_2) = 0.01866(C_{\text{ar}} + 0.375S_{\text{ar}}) \quad (7)$$

$$V(\text{N}_2) = 0.79V_k + 0.008N_{\text{ar}} \quad (8)$$

$$V(\text{H}_2\text{O}) = 0.111H_{\text{ar}} + 0.0124M_{\text{ar}} + 0.0161\alpha V_k \quad (9)$$

$$V_y = \{ [V(\text{RO}_2) + V(\text{N}_2) + V(\text{H}_2\text{O}) + (\alpha - 1)V_k] \} B_j \frac{T}{273.15} \quad (10)$$

$$v = \frac{V_y}{2HW} \quad (11)$$

式中,  $V_k$  为理论空气量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $V(\text{RO}_2)$  为  $\text{RO}_2$  量, 即  $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}_2$  总量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $V(\text{N}_2)$  为  $\text{N}_2$  量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $V(\text{H}_2\text{O})$  为  $\text{H}_2\text{O}$  量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $V_y$  为烟气流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H$  为折焰角底部到炉顶的高度,  $\text{m}$ ;  $W$  为炉膛宽度,  $\text{m}$ ;  $B_j$  为计算燃料消耗量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $T$  为炉膛出口烟温,  $\text{K}$ ;  $\alpha$  为过量空气系数。

灰粒半径  $r$  为

$$r = \frac{0.433 5 e^{\frac{1}{1.1904} \lg \left[ -\lg \left( 1 - \frac{R_{90}}{100} \right) \right]}}{2 \times 1000} \quad (12)$$

式中,  $R_{90}$  为  $R_{90}$  筛余量。

计算沉积层黏度  $\mu$  时采用文献[15]中计算模型, 灰粒黏度和煤灰成分之间的经验关联式为

$$\lg \mu = 4.468 [S]^2 + 1.265 \left( \frac{10^4}{T} \right) - 8.44 \quad (13)$$

式中,  $[S]$  为  $\text{SiO}_2$  比,  $[S] = \frac{w(\text{SiO}_2)}{w(\text{SiO}_2) + w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{CaO}) + w(\text{MgO})}$ , 其中  $w(i)$  为物质  $i$  的质量分数, %。

此时单个灰粒在沉积层中受到的黏结力  $F$  为

$$F = 2\pi(2Sr)^{0.5}\sigma \quad (14)$$

当灰粒均匀紧致铺满整个斜面时, 单位面积上的黏结力  $F_e$  为

$$F_e = F \left/ \left( \frac{3\sqrt{3}}{2} r^2 \right) \right. \quad (15)$$

假设沉积层处于稳定平衡时可忽略其他扰动, 这时不计烟道内气流黏性剪切力的影响。当折焰角  $\theta$  斜坡单位面积上总灰粒在黏结力、重力、摩擦力三者下平衡时, 有

$$mg \sin \theta = F_e + mg \cos \theta f \quad (16)$$

式中,  $m$  为单位面积上沉积层的质量, kg;  $f$  为静摩擦因数。

同时绕流折焰角的烟气中灰粒对沉积层有冲蚀情况, 灰粒对沉积层灰粒存在碰撞沉积层力。一般情况下, 灰粒对沉积层冲击力的动量矩径和沉积层对灰粒黏结力的动量矩径与灰粒半径为同一数量级, 壁面上灰粒被碰撞颗粒冲击的条件为

$$F_e > aF \quad (17)$$

式中,  $F_e$  为灰粒对沉积层的冲击力, 其计算模型同式(4)的受力分析;  $a$  为试验常数,  $0.1 < a < 10$ , 本文取 0.245。

## 2.2 塌灰预判模型

根据单位面积沉积层的黏结力、重力以及摩擦力之间的平衡关系式(16), 是否发生塌灰可分为以下 2 种情况:

1) 当单位面积沉积层质量  $m <$

$\frac{F_e}{g \sin \theta - g \cos \theta f}$  时, 即沉积层沿折焰角斜坡方向的黏结力和摩擦力之和大于重力沿折焰角斜坡的分力, 故而可得出沉积层不会脱落。

2) 当单位面积沉积层质量  $m >$

$\frac{F_e}{g \sin \theta - g \cos \theta f}$  时, 即沉积层沿折焰角斜坡方向的

黏结力和摩擦力之和小于重力沿折焰角斜坡的分力, 灰渣会由于重力作用脱离渣层, 即发生塌灰。

根据以上分析可得到最大沉积层高度。首先利用沉积层黏结力、重力和摩擦力平衡时的关系式求出单位面积上的沉积层质量, 由于单位面积上体积相当于沉积层垂直于沉积层接触壁面的沉积层高度, 故结合沉积层密度和折焰角的倾斜角便可得到临界状态沉积层垂直高度, 即在忽略烟气灰粒对沉积层冲击时的理论最大积灰高度, 称此高度为重力平衡高度。计算如下:

$$m = \frac{F_e}{g \sin \theta - g \cos \theta f} \quad (18)$$

$$V = H'_1 A = \frac{m}{\rho} \quad (19)$$

由于  $F_e$  是单位面积上的黏结力, 故  $A = 1 \text{ m}^2$ , 则

$$H'_1 = \frac{m}{\rho} \quad (20)$$

$$H_1 = H'_1 \cos \theta \quad (21)$$

式中,  $V$  为单位面积上垂直于折焰角斜面方向的灰粒体积;  $H'_1$  为垂直于折焰角斜面方向的积灰高度,  $m$ ;  $H_1$  为重力平衡高度,  $m$ 。

考虑沉积层减薄的另一个因素是烟气中灰粒对沉积层的冲击作用, 冲击力计算模型同式(4)受力分析。由于烟气中灰粒的冲击作用, 使沉积层厚度无法持续增加, 因烟气中灰粒对沉积层的冲击作用具有一定条件, 即冲击力与黏结力的冲击条件见式(17), 故而存在着限制沉积层增长的最小冲击力, 根据冲击力的计算式, 计算得到冲击沉积层的最小烟气速度  $v_{\min}$ , 由最小风速可得到最小风速限制下所对应的实际最大积灰高度, 即冲击力平衡高度  $H_2$ 。当积灰高度上升时, 烟气的流通截面缩小, 流动速度变大, 冲击力大于黏结力, 新附着在渣层上的颗粒被冲击掉, 因而积灰高度不会继续增高。计算公式为

当  $F_e = aF_e$  时:

$$v(2\pi r m_p \sigma)^{1/2} = 2\pi \left( 2 \frac{2vr^3 \rho \sin \theta}{9\mu} \right)^{0.5} \sigma \left/ \left( \frac{3\sqrt{3}}{2} r^2 \right) \right. \quad (22)$$

求解方程可得到临界烟气速度  $v_{\min}$ , 再求解实际最大积灰高度  $H_2$ :

$$H_2 = H - V_y / (2v_{\min} W) \quad (23)$$

最后比较理论最大积灰高度(重力平衡高度)  $H_1$  与实际最大积灰高度  $H_2$ (冲击力平衡高度)的大小, 判定是否会发生塌灰。

当  $H_1 > H_2$  时, 沉积层的摩擦力和黏结力大于重

力沿折焰角斜面的分力,可判断沉积层没有发生塌落的风险;当  $H_1 < H_2$  时,沉积层的摩擦力和黏结力小于重力沿折焰角斜面的分力,可判断沉积层有发生塌灰的风险。

### 3 实例计算及结果分析

浙江浙能台州第二发电有限责任公司锅炉为东方锅炉厂设计制造的 1 000 MW 超超临界参数

变压直流炉,采用对冲燃烧方式、固态排渣、单炉膛、一次再热、平衡通风、露天布置、全钢构架、全悬吊  $\pi$  型结构。以该锅炉为计算实例,输入其煤质分析数据、炉膛结构以及运行数据,对其进行计算并进行塌灰预判,从而实现对该锅炉的积灰和塌灰预判。

1) 输入煤质分析数据(表 1)、炉膛结构以及运行数据(表 2)。

表 1 煤质分析数据

Table 1 Analysis data of coal quality

元素分析/%					$M_{ar}/\%$	过量空气系数	计算燃料消耗量/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )				
$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{t,ar}$							
57.30	3.50	7.57	0.78	0.85	10.0	1.2	104.05				
煤灰成分分析/%											
$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO/Fe}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5/\text{MnO}$	$\text{SO}_3$	其他
48.96	33.58	4.25	0	4.20	1.20	1.32	0.70	0.76	0	3.50	1.53

表 2 炉膛结构和运行数据

Table 2 Structure and operation data of the furnace

炉膛出口烟温/ $^{\circ}\text{C}$	折焰角底部到炉顶的高度/m	炉膛宽度/m	$R_{90}$ 筛余量/%	折焰角倾角/ $^{\circ}$
1 035	12.32	33.97	20	35

2) 利用 LU 分解计算灰分的摩尔组分,并按照折焰角积灰与塌灰预判的数学模型,计算灰粒的表面张力、沉积层的黏度和烟气流速,最终得到灰粒单位面积上的黏结力和灰粒对沉积层的冲击力。

3) 根据单位面积沉积层的黏结力、重力以及摩擦力之间的平衡关系判断是否发生塌灰现象,并计算对沉积层冲击的最小烟气流速、实际最大积灰高度以及理论最大积灰高度,同时输出预判积灰高度和是否发生塌灰的结果。该程序计算出的折焰角实际积灰高度为 2.48 m,小于重力平衡高度 6.69 m,因此该锅炉在燃用设计煤种时折焰角处不会发生塌灰现象。

该计算结果与文献[16]中所测量的东方锅炉厂制造的 600 MW  $\pi$  型布置煤粉锅炉在折焰角处测得的沉积层高度为 2.8 ~ 3.0 m 较为一致。

### 4 结 论

1) 建立了超超临界锅炉折焰角斜坡积灰和塌灰预判模型,模型利用煤质相关参数、锅炉设计参数以及运行数据,首先求得烟气中煤灰颗粒的运动速度、深入沉积层深度和表面张力大小,并定量计算出

灰粒在折焰角斜面单位面积上的黏结力和灰粒对沉积层的冲击力大小,然后根据单位面积上的黏结力、重力以及摩擦力之间的平衡关系得到理论最大积灰高度和实际最大积灰高度,根据二者大小可判断沉积层是否发生塌灰现象。

2) 以浙江浙能台州第二发电有限责任公司 1 000 MW 超超临界  $\pi$  型布置煤粉锅炉为计算实例,对折焰角斜坡积灰和塌灰特性进行了计算分析,结果表明,实际积灰高度为 2.48 m,小于重力平衡高度 6.69 m,该锅炉在燃用设计煤种工况下折焰角处不会发生塌灰现象。

3) 计算实例中预判结果与实际运行测量值较为一致,说明所建立的积灰与塌灰计算模型准确可靠,可用于指导超超临界  $\pi$  型布置煤粉锅炉设计及优化运行。

### 参考文献 (References):

- [1] 周朝阳. 1 000 MW 超超临界机组超低排放改造工程分析[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(6): 118-123.  
ZHOU Chaoyang. Analysis on the retrofitting engineering of ultra-low pollutant emissions for a 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6): 118-123.
- [2] 沙龙. 1 000 MW 超超临界褐煤锅炉燃烧技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] 王旋. 煤粉工业锅炉节能增效技术改造研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1): 82-85.  
WANG Xuan. Technical innovation research on energy saving and efficiency improvement of industrial pulverized coal boiler[J].

- Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 82-85.
- [4] 廖运波. 某 600 MW 锅炉折焰角斜坡积灰分析及解决措施[J]. 环境与发展, 2017, 29(10): 231-232.  
LIAO Yunbo. Analysis of ash filling in a flaring angle slope of a 600 MW boiler and its solution[J]. Environment and Development, 2017, 29(10): 231-232.
- [5] 陈一平, 于鹏峰, 邹自敏, 等. 火电厂锅炉折焰角斜坡积灰原因及对策[J]. 中国电力, 2011, 44(2): 46-48.  
CHEN Yiping, YU Pengfeng, ZOU Zimin, et al. Study on ash fouling of boiler furnace arch and its countermeasures in coal fired power plant[J]. Electric Power, 2011, 44(2): 46-48.
- [6] 姚英俊. 燃煤电站锅炉折焰角积灰的原因分析及对策研究[J]. 中国标准化, 2016(15): 241, 243.  
YAO Yingjun. Coal-fired power plant boiler flame angle analysis of the causes of formation and countermeasures research[J]. China Standardization, 2016(15): 241, 243.
- [7] 周保中. 基于支持向量机的超超临界锅炉受热面污染监测模型研究[J]. 发电与空调, 2016, 37(6): 36-38, 35.  
ZHOU Baozhong. Research on fouling monitoring model for heating surface of ultra-supercritical boiler based on the support vector machine[J]. Power Generation Technology, 2016, 37(6): 36-38, 35.
- [8] 胡洪伟. 灰分沉积特性的理论和实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [9] 卢红书. 锅炉折焰角塌灰对燃烧的影响及防范措施[J]. 东北电力技术, 2016, 37(6): 47-48, 52.  
LU Hongshu. Analysis on impact and countermeasures of ash fouling for boiler furnace arch[J]. Northeast Electric Power Technology, 2016, 37(6): 47-48, 52.
- [10] 麦勇军, 徐立力, 李军安, 等. 折焰角型锅炉频繁灭火原因分析与处理[J]. 广西电力, 2014, 37(3): 47-50.  
MAI Yongjun, XU Lili, LI Jun'an, et al. Analysis and treatment of frequent outfire of furnace arch type boiler[J]. Guangxi Electric Power, 2014, 37(3): 47-50.
- [11] 兰建辉. 670 MW “W”火焰锅炉折焰角积灰治理[J]. 广西电力, 2013, 36(6): 50-52.  
LAN Jianhui. Treatment of ash deposition of furnace arch in 670 MW “W” flame boiler[J]. Guangxi Electric Power, 2013, 36(6): 50-52.
- [12] 陆雪强. 锅炉折焰角塌灰原因分析及处理[J]. 发电设备, 2011, 25(6): 444-446.  
LU Xueqiang. Cause analysis on ash collapsing at furnace arch in a boiler and the countermeasures[J]. Power Equipment, 2011, 25(6): 444-446.
- [13] 许继芳, 李建朝, 翁文凭, 等. MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系富硼渣表面张力的计算[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1): 206-214.  
XU Jifang, LI Jianchao, WENG Wenping, et al. Calculation of surface tension for MgO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molten boron-rich slag system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 206-214.
- [14] 岑可法, 樊建人, 池作和, 等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [15] 许洁. 典型煤灰与混合灰熔融特性及粘温特性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [16] 陈一平, 陈耀华, 杨剑锋, 等. 国产首台 2 030 t/h “W”火焰锅炉技术改造[J]. 中国电力, 2009, 42(2): 40-44.  
CHEN Yiping, CHEN Yaohua, YANG Jianfeng, et al. Technical retrofit on the first domestic 2 030 t/h W-flame boiler[J]. Electric Power, 2009, 42(2): 40-44.