

# 纯烧准东煤新型流化床锅炉热力计算方法解析与应用

王世海<sup>1</sup>, 马剑飞<sup>2</sup>, 鲁佳易<sup>3</sup>, 许 猛<sup>1</sup>, 赵文博<sup>2</sup>, 刘坤朋<sup>1</sup>, 王建江<sup>1</sup>, 魏 博<sup>1</sup>

(1.新疆大学 化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2.新疆新能源化工有限责任公司, 新疆 五家渠 831300;  
3.东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 成都 611731)

**摘要:**准东煤由于高钠特性, 燃烧过程中带来了严重的沾污结渣问题, 限制其广泛使用。借鉴现有循环流化床锅炉热力计算方法, 对纯烧准东煤新型流化床锅炉开展热力计算, 验证锅炉在不同负荷下运行参数。结果表明: 通过优化热力计算参数建立了 1 套包括炉膛及分离器热平衡计算、物料平衡计算等在内的适用于某化工厂现役 325 t/h 循环流化床锅炉的热力计算方法, 计算得出的炉膛及各级受热面进出口烟气温度及工质温度计算值与实测值基本一致, 可通过锅炉变负荷或变煤种工况, 计算实际运行相应参数, 为锅炉运行提供参考。同时, 对纯烧准东煤新型循环流化床锅炉, 运行实测值与理论计算值之间的差别进行了分析。

**关键词:**热力计算; 循环流化床锅炉; 炉膛; 受热面

中图分类号: TK222 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2023)S2-0377-05

## Analysis of thermodynamic calculation method and application of new type fluidized bed boiler burning Zhundong coal

WANG Shihai<sup>1</sup>, MA Jianfei<sup>2</sup>, LU Jiayi<sup>3</sup>, XU Meng<sup>1</sup>, ZHAO Wenbo<sup>2</sup>, LIU Kunpeng<sup>1</sup>, WANG Jianjiang<sup>1</sup>, WEI Bo<sup>1</sup>

(1.School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2.Xinjiang Xinye Energy and Chemical Co., Ltd., Wujiaqu 831300, China; 3.Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Zhundong coal, due to its high sodium character, has brought about serious fouling and slagging problems in the combustion process, limiting its widespread use. Referring to the existing thermodynamic calculation method of the circulating fluidized bed boiler, the thermodynamic calculation of the new type of fluidized bed boiler burning Zhundong coal was carried out to verify the operating parameters of the boiler under different loads. Results show that a thermodynamic calculation method for 325 t/h circulating fluidized bed boiler in a chemical plant is established by optimizing thermodynamic calculation parameters, including heat balance calculation and material balance calculation of furnace and separator, the calculated flue gas temperature and working medium temperature at the inlet and outlet of the furnace and heating surfaces at all levels are basically consistent with the measured values. The corresponding parameters of actual operation can be calculated through the variable load or coal of the boiler, which can provide data reference for the boiler operation. The difference between the measured value and the theoretical value of the new type circulating fluidized bed boiler burning Zhundong coal was analyzed.

**Key words:** thermal calculation; circulating fluidized bed boiler; boiler furnace; heat transfer surfaces

## 0 引 言

循环流化床燃烧技术是 20 世纪 70 年代末出现的清洁煤燃烧技术。循环流化床锅炉由于具有燃料适应性广、负荷调节范围大、燃烧效率高、NO<sub>x</sub> 排放低等特点, 在我国得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。据不完全统

计, 目前我国在建或已投运循环流化床锅炉发电机组已经超过 4 000 台, 总装机容量已超过 1 亿 kW<sup>[4]</sup>。

循环流化床锅炉炉膛内的传热过程非常复杂, 尚未找到能准确描述与实际过程完全相符的传热模型。目前关于循环流化床传热理论研究,

收稿日期: 2022-11-14; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.22111402

基金项目: 煤燃烧国家重点实验室开放课题基金资助项目 (FSKLCCA2201)

作者简介: 王世海 (1999—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生。E-mail: wshihai99@163.com

通讯作者: 魏 博 (1985—), 男, 陕西高陵人, 教授, 博士。E-mail: weiboxju@163.com

引用格式: 王世海, 马剑飞, 鲁佳易, 等. 纯烧准东煤新型流化床锅炉热力计算方法解析与应用[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 377-381.

WANG Shihai, MA Jianfei, LU Jiayi, et al. Analysis of thermodynamic calculation method and application of new type fluidized bed boiler burning Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 377-381.

提出基于经验的或近似的热力计算理论模型,该计算模型中存在大量经验参数,结果可能与锅炉实际运行数据存在重大偏差,无法准确指导工程应用<sup>[5-9]</sup>。

笔者针对某化工厂现役 325 t/h 纯烧准东煤新型循环流化床锅炉开展热力计算。一方面,根据锅炉设计结构及煤种煤质进行校核;另一方面,根据锅炉不同负荷运行时,各受热面进出口烟气温度及工质温度实测值与计算值对比,并验证其计算值。

## 1 试验

### 1.1 锅炉结构及汽水流程

锅炉为高温高压自然循环、单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢结构焊接结构的全封闭布置循环流化床锅炉,型号为 DG260/9.81-III 型。锅炉主要由 1 个膜式水冷壁炉膛、2 台冷却式旋风分离器和 1 个由汽冷包墙包覆的烟道和尾部竖井 4 部分组成,锅炉结构如图 1 所示。

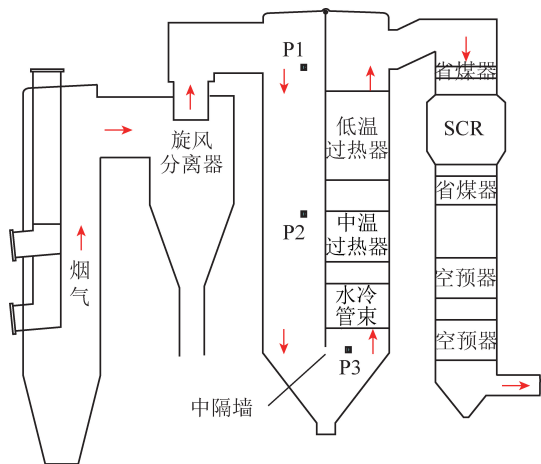


图1 新型循环流化床锅炉结构

汽冷烟道布置在旋风分离器与尾部竖井之间,由汽冷包墙包覆而成,中间由隔墙将烟道分为 2 部分,分别为下行烟道和上行烟道。下行烟道为空烟道,上行烟道沿烟气流程分别布置 1 组水冷管束、1 组中温过热器和 2 组低温过热器。

本锅炉过热蒸汽流程为:锅筒→旋风分离器→汽冷烟道两侧包墙→汽冷烟道前、后包墙→汽冷烟道中隔墙→低温过热器→一级减温器→中温过热器→二级减温器→高温过热器(屏式)。高温过热器布置在炉膛内,中温过热器和低温过热器布置在汽冷烟道的后烟道内。

### 1.2 锅炉结构及汽水流程

该锅炉的热力计算流程如图 2 所示。

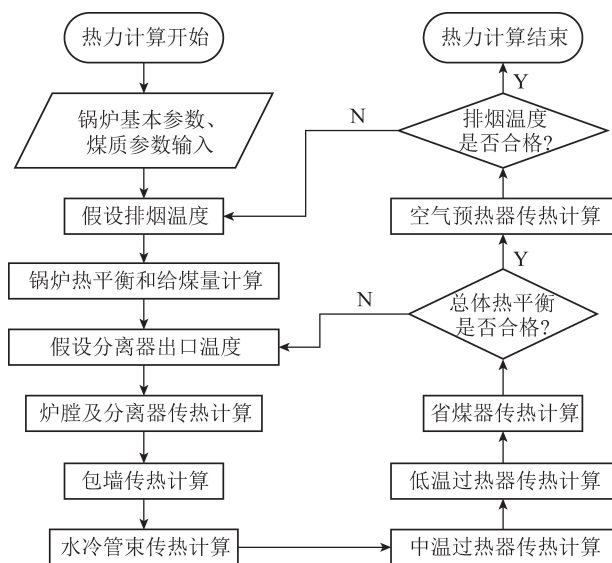


图2 新型循环流化床锅炉热力计算流程

### 1.3 计算方法

#### 1.3.1 灰循环倍率计算

循环流化床锅炉炉膛、分离器内的燃烧与传热过程均有大量循环灰参与,循环灰量  $B_s$  与炉膛、分离器内的传热能力相关。工程中将炉内循环灰量与入炉灰量的比值称为灰循环倍率  $a_n$ , 即

$$B_s = \frac{a_n B A_{ar}}{100} \quad (1)$$

其中,  $B$  为锅炉燃料消耗量, kg/s;  $a_n$  主要取决于分离器效率和飞灰份额。若燃烧工况良好,  $a_n$  可由式(2)计算:

$$a_n = \frac{a_f \eta_{spr}}{1 - \eta_{spr}} \quad (2)$$

式中,  $a_f$  为飞灰份额;  $\eta_{spr}$  为分离器效率。

#### 1.3.2 炉膛热力计算

炉膛燃烧产物热平衡与传热计算公式为

$$Q_1^R = \varphi [X Q_{1s}^m - (I''_{mz} - I'_{ze}) \frac{B_s}{B_j} - I''_m] \quad (3)$$

$$Q_1^m = \frac{(K_m H_j^m + K_s H_j^s) (\vartheta'' - t_{bh}) + K_q H_j^q (\vartheta'' - t_b)}{B_j} \Delta t \quad (4)$$

式中,  $Q_1^R$  为 1 kg 燃料燃烧产物向炉膛受热面内工质和循环灰传递的热量, kJ/kg;  $\varphi$  为锅炉机组保温系数;  $X$  为炉膛放热份额;  $Q_{1s}^m$  为炉膛有效放热量, kJ/kg;  $I''_{mz}$  为炉膛出口循环灰焓, kJ/kg;  $I'_{ze}$  为炉膛进口循环灰焓, kJ/kg;  $B_j$  为计算燃料消耗量, kg/h;  $I''_m$  为炉膛出口烟焓, kJ/kg;  $Q_1^m$  为炉膛受热面内工质的吸热量, kJ/kg;  $K_m$  为炉膛平均传热系数, kJ/(m<sup>2</sup> · h · °C);  $H_j^m$  为炉膛膜式水冷壁计算受热面积, m<sup>2</sup>;  $K_s$  为炉膛水冷屏传热系数, kJ/(m<sup>2</sup> · h · °C);  $H_j^s$  为

炉膛水冷屏计算受热面积,  $m^2$ ;  $\vartheta''$  为炉膛出口温度,  $^{\circ}C$ ;  $t_{bh}$  为炉膛蒸发受热面内工质的饱和温度,  $^{\circ}C$ ;  $K_q$  为炉膛汽冷屏传热系数,  $kJ/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C)$ ;  $H_j^R$  为炉膛汽冷屏计算受热面积,  $m^2$ ;  $\bar{t}_b$  为汽冷屏进、出口平均工质温度,  $^{\circ}C$ ;  $\Delta t$  为平均温差。

炉膛热力计算时,各受热面传热系数  $K$  及平均温差  $\Delta t$  与炉膛出口烟温有关,因此计算时采用逐次逼近法。先假设一个炉膛出口温度,分别计算  $Q_1^R$  和  $Q_1^m$ ,当  $|Q_1^R - Q_1^m|/Q_1^R < 2\%$  时,说明计算结果有效。

### 1.3.3 分离器热力计算

分离器内燃烧产物热平衡与传热计算公式为

$$Q_s^R = \varphi \left[ (I_m'' - I_m') + X_s Q_{is}^m + (I_{mz}'' - I_{ze}') \frac{B_s}{B_j} \right], \quad (5)$$

$$Q_s^m = \frac{\sigma a H_j^4 (T_g^4 - T_s^4)}{B_j}, \quad (6)$$

式中,  $Q_s^R$  为 1 kg 燃料燃烧产物及循环灰向分离器受热面内工质传递的热量,  $kJ/kg$ ;  $Q_s^m$  为分离器受热面的计算传热量,  $kJ/kg$ ;  $I_m'$  为分离器出口烟气焓,  $kJ/kg$ ;  $X_s$  为分离器燃烧份额;  $\sigma$  为波尔兹曼常数,  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $a$  为分离器系统黑度;  $T_g$  为分离器内烟气平均温度,  $K$ ;  $T_s$  为分离器内受热面壁温,  $K$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 设计煤种下锅炉校核计算

根据上述计算方法,采用锅炉实际结构参数以及设计工况下煤质参数,对锅炉系统进行热力计算,以获得与设计工况一致的计算结果。计算所得的锅炉部分参数与设计值的比较见表 1。由表 1 可知,各受热面出口烟气温度计算值与设计值偏差不大,

表 2 新型循环流化床锅炉设计煤种和实际煤种的煤质特性

煤样	工业分析/%				元素分析/%				$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
	$A_{ar}$	$M_{ar}$	$V_{daf}$	$FC$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$S_{t,ar}$	
设计煤种	6.59	26.00	31.19	36.22	52.83	2.36	11.25	0.43	19.11
实际煤种	10.23	23.90	33.21	32.66	52.70	2.46	9.92	0.37	18.69

锅炉准确的运行数据是在锅炉同一负荷运行期间,保持锅炉主蒸汽流量、燃煤量、一二次风量稳定,且无吹灰等其他操作的运行下获得。炉膛平均床温的变化如图 3 所示。可知运行期间炉膛床温在  $860^{\circ}C$  上下波动,但变化较小,说明锅炉稳定运行。

锅炉实际运行过程中,实时记录各受热面进出口烟气温度,并与锅炉设计参数进行对比,结果见表 3。可知实际运行过程中烟气分布与设计工况存在

最大误差为  $8^{\circ}C$ 。

表 1 新型循环流化床锅炉设计值与计算值比较(设计煤种)

项目	设计值	计算值	误差	
主蒸汽	流量/( $t \cdot h^{-1}$ )	325	325	—
	压力/MPa	9.81	9.81	—
	温度/ $^{\circ}C$	540	540	—
炉膛	炉膛温度/ $^{\circ}C$	860	868	-8
	空烟道温度/ $^{\circ}C$	724	726	-2
	水冷管束温度/ $^{\circ}C$	644	646	-2
出口烟气	中温过热器温度/ $^{\circ}C$	550	553	-3
	低温过热器温度/ $^{\circ}C$	453	454	-1
	省煤器温度/ $^{\circ}C$	207	202	5
空气预热器温度/ $^{\circ}C$	130	126	4	

### 2.2 设计工况与实际运行工况锅炉参数对比

锅炉设计煤种和实际运行煤种的煤质存在差异,见表 2。可知设计煤种与实际煤种的收到基氧、收到基灰分及低位发热量等都存在差异,将影响炉内的燃烧及传热过程。一般来说,灰分增加,会阻碍可燃物与氧气结合,减缓着火速度,降低燃烧温度,使燃烧稳定性变差,导致煤粉燃尽度下降,固体不完全燃烧热损失增加<sup>[10]</sup>。此外,灰分增加,将加剧锅炉受热面的磨损与沾污,导致排烟温度升高,排烟损失增大。低位发热量降低,会使炉膛容积热负荷降低,炉膛温度下降,不利于煤的燃烧和燃尽,燃烧效率和锅炉运行热效率均下降;且低位发热量降低到一定程度后,会引起燃烧不稳定、不完全而导致熄火。反之,低位发热量升高,锅炉容积热负荷上升,炉膛温度升高,烟气量增大,排烟温度上升<sup>[11]</sup>;低位发热量过高时,可能导致炉膛温度局部过高而结焦,影响循环流化床锅炉安全稳定运行。

一定差异,空烟道出口位置实测烟气温度为  $658^{\circ}C$ ,而设计时烟气温度为  $724^{\circ}C$ ,相差  $66^{\circ}C$ 。主要原因有:① 实际煤种与设计煤种存在一定差异,烟气流量及成分存在差别;② 烟气经旋风分离器流向空烟道,在空烟道内湍流作用加强,使传热系数有一定程度增加,导致烟气温度低于设计值。由表 3 可知,在省煤器出口位置的烟气温度高于设计值,这与其他位置的烟气分布存在差别。这可能是由于锅炉运行

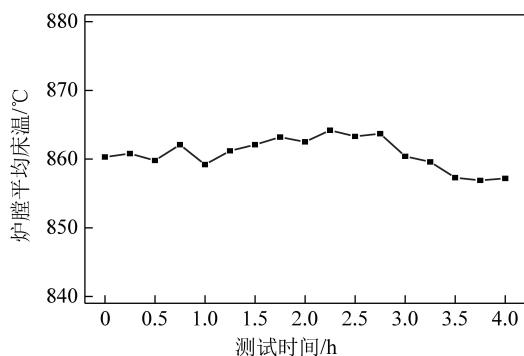


图3 锅炉运行期间炉膛平均床温变化

过程中在尾部受热面产生积灰,导致传热系数降低,出口位置烟气温度的升高。综上所述,锅炉实际运行过程相关参数与设计工况存在差异,因此需根据锅炉实际运行状况对各级受热面的传热系数进行修正,进而获得与实际较吻合的热力计算结果。

表3 100%负荷下新型循环流化床锅炉设计值与实测值对比

项目	设计值	实测值	误差	
主蒸汽	流量/(t·h <sup>-1</sup> )	325	326	-1
	压力/MPa	9.81	9.67	0.14
	温度/°C	540	533	7
出口烟气	炉膛温度/°C	860	866	-6
	空烟道温度/°C	724	658	66
	水冷管束温度/°C	644	573	71
	中温过热器温度/°C	550	503	47
	低温过热器温度/°C	453	438	15
	省煤器温度/°C	207	239	-32
	空气预热器温度/°C	130	157	-27

### 2.3 不同负荷计算结果与实测结果对比

对锅炉燃用实际煤种以及不同负荷下实际运行过程中各受热面换热特性进行验证,100%负荷下新型循环流化床锅炉运行参数实测值与理论计算值见表4。

表4 100%负荷下新型循环流化床锅炉实测值与计算值对比

项目	实测值	计算值	误差	
主蒸汽	流量/(t·h <sup>-1</sup> )	326	326	0
	压力/MPa	9.67	9.67	0
	温度/°C	533	533	0
出口烟气	炉膛温度/°C	866	861	5
	空烟道温度/°C	658	655	3
	水冷管束温度/°C	573	577	-4
	中温过热器温度/°C	503	516	-13
	低温过热器温度/°C	438	444	-6
	省煤器温度/°C	239	234	5
	空气预热器温度/°C	157	159	-2

通过锅炉运行期间各受热面出口烟气温度的实测值和计算值可以看出,计算值与实测值基本吻合,最大偏差为13℃。说明修正后的热力计算方法及过程较合理,能较准确计算锅炉炉膛及各级受热面温度。同时,锅炉不同负荷运行期间其烟气流量有很大差异,影响炉内换热过程。为此,通过调整锅炉负荷,并统计锅炉在不同负荷运行期间炉膛及各级受热面烟气及工质参数,进一步验证本文热力计算方法及过程。

锅炉不同负荷下运行参数实测值及理论计算值的比较见表5、6。可知锅炉不同负荷下实测值与计算值基本一致,67%负荷下最大偏差为14℃,50%负荷下最大偏差为12℃。因此,可根据该热力计算过程为锅炉变负荷或变煤种的运行提供指导,在锅炉煤种或负荷变化时,可根据该方法提前确定锅炉内部各级受热面温度和工质参数的大致区间范围。若锅炉系统中部分受热面温度与热力计算结果偏差较大时,可有针对性处理,从而保证锅炉稳定运行。

表5 67%负荷下新型循环流化床锅炉实测值与计算值对比

项目	实测值	计算值	误差	
主蒸汽	流量/(t·h <sup>-1</sup> )	222	222	—
	压力/MPa	9.55	9.55	—
	温度/°C	535	535	—
出口烟气	炉膛温度/°C	826	820	6
	空烟道温度/°C	588	595	-7
	水冷管束温度/°C	521	529	-8
	中温过热器温度/°C	466	480	-14
	低温过热器温度/°C	415	422	-7
	省煤器温度/°C	230	234	-4
	空气预热器温度/°C	149	147	-2

表6 50%负荷下新型循环流化床锅炉实测值与计算值对比

项目	实测值	计算值	误差	
主蒸汽	流量/(t·h <sup>-1</sup> )	161	161	—
	压力/MPa	9.41	9.41	—
	温度/°C	534	534	—
出口烟气	炉膛温度/°C	802	790	12
	空烟道温度/°C	519	525	-6
	水冷管束温度/°C	458	461	-3
	中温过热器温度/°C	427	424	3
	低温过热器温度/°C	394	399	-5
	省煤器温度/°C	210	216	-6
	空气预热器温度/°C	134	131	3

## 3 结论

1) 根据锅炉相关参数,通过优化热力计算参数

建立了一套适用于某化工厂现役 325 t/h 循环流化床锅炉的热力计算方法,包括炉膛及分离器热平衡计算,物料平衡计算等。

2)通过比较锅炉不同负荷下运行实测值与理论计算值,结果表明不同负荷下各级受热面进出口的烟气温度的计算值与实际运行值基本吻合。

3)本文建立的锅炉热力计算方法合理,可用于锅炉运行相关问题分析,为锅炉运行提供数据参考。

#### 参考文献:

- [1] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,等. 循环流化床锅炉燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力,2016,49(1):1-13.
- [2] 于龙,吕俊复,王智微,等. 循环流化床燃烧技术的研究展望[J]. 热能动力工程,2004,19(4):336-342.
- [3] 李斌,李建锋,盛建华,等. 300 MW 级循环流化床锅炉机组运行分析[J]. 中国电力,2012,45(2):35-39.
- [4] 刘丁赫,冯玉鹏,孙瑞彬,等. 超临界循环流化床锅炉技术发展现状与展望[J]. 电站系统工程,2022,38(1):8-12.
- [5] 刘向军,赵燕,徐旭常. 循环流化床内煤粉颗粒团燃烧行为理论分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(1):30-34.
- [6] 周鸿波,钟巍,童水光. 基于经验的循环流化床锅炉统一热力计算模型[J]. 中国电机工程学报,2006,26(17):94-99.
- [7] 程乐鸣,岑可法,倪明江,等. 循环流化床锅炉炉膛热力计算[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12):147-152.
- [8] WANG Qin-hui, LUO Zhong-yang, NI Ming-jiang, et al. Particle population balance model for a circulating fluidized bed boiler[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 93(2):121-133.
- [9] YANG Jing, WANG Li, TONG Lige, et al. Modeling of radiative heat transfer between high-temperature fluidized beds and immersed walls[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(15):3195-3199.
- [10] 李祺亮. 1 000 MW 超超临界直流锅炉变煤种运行特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
- [11] 吴剑恒,连荣清,李波扬,等. 变煤种对循环流化床锅炉的影响分析及应对措施[J]. 电力学报,2020,35(2):149-161.