

超临界循环流化床锅炉屏式过热器 吸热量偏差特性研究

牛田田¹, 张伟强², 辛胜伟³, 李强², 王虎³,

曹培庆³, 杨浩昱¹, 聂超¹, 杨冬^{1*}

(1. 动力工程多相流国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049; 2. 中国华能集团清洁能源技术研究院, 北京市 昌平区 102209; 3. 国家能源集团循环流化床技术研发中心, 陕西省 西安市 710065)

Study on the Heat Absorption Deviation Characteristics of the Platen Superheaters in the Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler

NIU Tiantian¹, ZHANG Weiqiang², XIN Shengwei³, LI Qiang², WANG Hu³,
CAO Peiqing³, YANG Haoyu¹, NIE Chao¹, YANG Dong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. Clean Energy Research Institute of China Huaneng Group, Changping District, Beijing 102209, China; 3. CHN Energy CFB Technology R&D Center, Xi'an 710065, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: As a technology with comprehensive advantages, supercritical circulating fluidized bed (CFB) combustion technology is widely used. However, the leakage of the platen superheaters in the furnace frequently occurs, so it is necessary to research and analysis of thermal-hydraulic characteristics and heat absorption characteristics. According to the mathematical model of the complex flow network system established by the platen superheaters of the supercritical CFB boiler, and the actual furnace measurement data of the temperature distribution of the platen superheaters, the heat load was inversely deduced. The flow distribution, outlet steam temperature distribution and wall temperature characteristics of the platen superheaters in the 350MW supercritical CFB boiler of Hequ Power Plant and the 600MW supercritical CFB boiler of Baima Power Plant were calculated, along with the heat absorption distribution and the thermal deviation coefficient distribution. The calculation results show that the heat absorption and thermal deviation coefficient of the platen heating surface are smaller on the near wall side and the fire side, and the two are larger in the middle of the heating surface. This is due to the difference in the concentration of smoke particles. The analysis and research of heat absorption and heat

transfer coefficient provide a theoretical basis for the design and optimization of supercritical CFB boilers.

KEY WORDS: supercritical circulating fluidized bed boiler; platen heating surface; hydrodynamic characteristics; heat absorption; thermal deviation coefficient

摘要: 超临界循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)燃烧技术作为一种具有综合性优点的技术,被广泛应用,但其炉膛中屏式过热器爆管泄漏问题频繁发生,故有必要对其水动力特性及吸热量偏差特性进行研究分析。根据针对超临界CFB锅炉炉膛内屏式过热器所建立的复杂流动网络系统的数学模型,及屏式过热器出口汽温分布实际测量数据,对热负荷进行反推,计算分析了河曲电厂350MW超临界CFB锅炉以及白马电厂600MW超临界CFB锅炉中屏式过热器流量分配、出口汽温分布及壁温特性,并计算得到了屏式过热器中吸热量热偏差系数分布。计算结果表明,屏式过热器吸热量及热偏差系数在近壁侧、近火侧较小,在受热面中部则二者较大,这是由于各处烟气颗粒浓度的不同而影响传热造成,对吸热量及传热系数的分析研究对超临界CFB锅炉的设计及优化改造提供了理论依据。

关键词: 超临界循环流化床锅炉; 屏式过热器; 水动力特性; 吸热量; 热偏差系数

0 引言

近年来,大力发展的循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)燃烧技术是一种低污染、高效

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0600201); 国家自然科学基金项目(52076172)。

National Key R&D Program of China (2016YFB0600201); National Natural Science Foundation of China (52076172).

的清洁燃煤技术^[1-2]。循环流化床锅炉内大量的内外循环使得其可以使用各类燃料以及调节更广泛范围的热负荷^[3]，循环流化床锅炉高效的脱硫技术(可达90%以上)以及 NO_x 的低排放，从根本上解决了酸雨问题。同时，循环流化床锅炉还具有燃烧效率高、可高效利用资源以及投资和运行成本相对较低等优点^[4-6]，故在国内外得到了迅猛发展。

为了进一步提高发电效率，提高蒸汽参数、发展超临界和超超临界火电机组成为未来趋势^[7]。从上个世纪九十年代起，国内外锅炉制造商已经投入大量的精力研发超临界循环流化床锅炉。国内外超临界循环流化床锅炉的陆续投运是循环流化床燃烧技术里程碑式发展的标志^[8]，中国已然成为国际最大的超临界 CFB 锅炉市场^[9]。随着日益严格的环保要求，大容量、高参数 CFB 锅炉极具发展前景。

为了满足锅炉蒸汽参数的要求，在锅炉中布置过热器、再热器等换热受热面是必不可少的。它们属于单相换热器，即管内蒸汽流动吸热，管外的烟气和物料冲刷放热。由于过热器及再热器中工质温度和压力均较高，且烟气温度也较高，导致过热器及再热器中的管子壁温一直处于较高的温度，因此屏式受热面的超温爆管现象十分频繁^[10]。在某流化床锅炉电厂爆管泄漏事故统计分析中发现，40%的泄漏事故发生在了屏式过热器。其中超温、耐磨材料脱落以及变形拉裂都是屏式过热器泄漏事故发生的原因，其中磨损问题最为突出^[11]。

屏式过热器泄漏爆管的大多是由于受热面结构引起的流量偏差以及受热面传热系数计算的不够精确这2方面因素造成^[12]，并且人们很早就发现物料浓度是传热系数的最大影响因素^[13]，物料浓度越大，传热系数越大。目前虽然已有大量关于 CFB 锅炉受热面传热试验和计算的研究^[14-18]，但炉膛的水冷壁受热面以及小型锅炉屏式受热面的研究居大多数，针对大型的 CFB 锅炉的屏式受热面的传热特性研究较少。因此锅炉在实际运行中会偏离设计值，导致屏式受热面超温变形及爆管等现象层出不穷，给电厂的经济运行带来影响。

超超临界 CFB 锅炉高温再热器出口蒸汽温度为 623°C ，出口集箱管座材料采用 T92，其许用温度为 650°C ，考虑 10°C 的壁温裕量，最高出口汽温需控制在 640°C 以下，才能保证高温再热器的安全运行。对于布置在炉膛内的高温再热器来说，其最高温度偏差控制只有 17°C 。只有准确把握高温再热

器及过热器的出口汽温偏差及吸热量偏差分布规律，才能进行精确设计和计算，以确定节流圈尺寸及耐磨材料敷设高度及区域，对超(超)临界 CFB 锅炉高温受热面的设计和安全运行提供理论依据。因此，分析 CFB 锅炉中的流动特点，结合工程实践，综合形成比较可靠的 CFB 锅炉炉内屏式受热面传热计算方法是一项非常有意义的工作。

本文根据超临界 CFB 锅炉炉膛内屏式过热器流动网络系统所遵循的质量、动量、能量守恒方程及试验关联式，建立了计算复杂流动网络系统回路流量及节点压力的数学模型，开发了直接求解非线性方程组的水动力特性和壁温计算程序，对河曲电厂350MW超临界CFB锅炉以及白马电厂600MW超临界CFB锅炉中屏式过热器进行了水动力特性分析。根据屏式过热器出口汽温分布实测数据，通过对热负荷进行反推的方法，使计算结果与实测数据偏差达到可控范围内，对2电厂CFB锅炉中屏式过热器不同负荷下出口汽温分布及壁温特性进行了计算分析，并通过计算得到了两电厂屏式过热器中吸热量及热偏差分布特性。

由计算结果可知，2电厂屏式过热器各个负荷下，吸热量及热偏差系数的分布趋势相似，在屏式过热器近壁侧及近火侧的管子吸热量与热偏差系数较小，中间部分的管子吸热量与热偏差系数均较大，这与炉膛内与管壁处气固两相混合、烟气侧悬浮颗粒的浓度差别有密切关系。考虑到外置床的制造成本及运行复杂性，超(超)临界循环流化床锅炉将会取消外置床布置方案。这样屏式再热器就会布置在炉膛内，其吸热偏差分布特性与屏式过热器类似。通过对屏式过热器中管子吸热量及热偏差分布规律的分析研究，为超(超)临界CFB锅炉中屏式过热器及高温再热器优化改造提供了理论依据。

1 超临界 CFB 锅炉简介

河曲电厂350MW超临界CFB锅炉为超临界直流炉，单炉膛、布置方式为M型、平衡通风、采用一次中间再热、采用循环流化床燃烧技术，采用汽冷式旋风分离器进行气固分离。

炉膛内前墙布置6片二级中温过热器管屏、6片高温过热器管屏、6片高温再热器管屏。管屏均采用膜式壁结构，垂直布置。为防止受热面管子的磨损，在下部转弯段、密相区、管屏中间及穿墙处的受热面管子上均敷设耐磨材料^[19]。

白马电厂 600MW 超临界 CFB 锅炉为超临界直流炉，双布风板、单炉膛、布置方式为 H 型、平衡通风、采用一次中间再热、采用循环流化床燃烧技术，采用汽冷式旋风分离器进行气固分离^[20]。

炉膛内还布置有 16 片屏式高温过热器，管屏采用膜式壁结构，垂直布置，在屏式过热器下部转弯段、管屏中间以及穿墙处的受热面管子上均敷设耐磨材料，防止受热面管子的磨损。

2 屏式过热器出口汽温测点布置及现场测量结果

2.1 出口汽温测点布置

锅炉受热面中，过热器、再热器等是极其重要的组成部分,其吸热量占工质总吸热量的 50%以上，是受热面中工作条件最为恶劣的部件。过热器的材料使用温度都处于极限温度，因此过热器对热偏差较为敏感^[21]。为获得超临界 CFB 锅炉炉膛屏式高温过热器吸热量偏差分布特性，提出屏式过热器管屏热偏差控制措施。河曲电厂 350MW 超临界 CFB 锅炉及白马电厂 600MW 超临界 CFB 锅炉炉膛中屏式高温过热器布置及具体安装测温点如图 1 所示。图 1 中红色部分为被布置测点的屏式过热器。针对图中的所布测温点，得到屏式过热器不同负荷下不同管子的实炉测量出口汽温数据，通过热负荷反推的方法，使得计算所得出口汽温与实炉测量数据相符合，若二者精度要求满足误差，则认为假设沿炉膛深度方向的热偏差为真实热偏差，进而分析计算得到屏式过热器吸热量及热偏差系数分布。

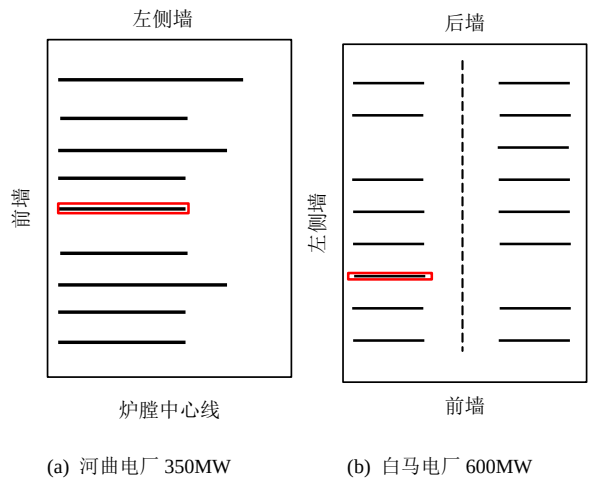


图 1 壁温测点布置示意图
Fig. 1 Layout of wall temperature measure points

2.2 现场测量结果

通过位于炉膛中心区域的一片屏式高温过热

器管屏出口穿出顶棚位置处加装的全屏的测点，得到现场测量结果，河曲电厂中屏式高温过热器为全屏 40 个测点，白马电厂中屏式高温过热器为全屏 55 个测点。表 1、2 给出 2 电厂在满负荷运行时现场测量出口汽温数据。

表 1 河曲电厂现场测量数据
Table 1 Measured data in Hequ Power Plant

序号	T/℃	序号	T/℃	序号	T/℃	序号	T/℃
1	556	11	563	21	571	31	575
2	556	12	564	22	570	32	574
3	559	13	565	23	571	33	572
4	563	14	558	24	573	34	574
5	560	15	566	25	577	35	575
6	561	16	572	26	575	36	578
7	564	17	570	27	572	37	580
8	564	18	568	28	572	38	572
9	564	19	567	29	571	39	561
10	564	20	570	30	575	40	566

表 2 白马电厂现场测量数据
Table 2 Measured data in Baima Power Plant

序号	T/℃	序号	T/℃	序号	T/℃	序号	T/℃
1	534.3	15	558.3	29	561.7	43	569.1
2	552.2	16	558.8	30	565.4	44	569.1
3	555.2	17	560.0	31	563.7	45	571.4
4	559.1	18	555.9	32	561.4	46	567.5
5	558.7	19	556.8	33	564.3	47	570.0
6	556.4	20	556.4	34	563.1	48	571.1
7	561.3	21	559.3	35	565.4	49	572.7
8	558.8	22	558.7	36	566.2	50	573.7
9	559.7	23	561.0	37	565.5	51	573.2
10	556.2	24	559.2	38	567.3	52	571.6
11	557.2	25	560.3	39	567.3	53	552.0
12	557.4	26	559.1	40	569.1	54	549.7
13	558.6	27	558.2	41	567.6	55	553.4
14	550.7	28	560.7	42	565.6		

3 屏式过热器吸热量偏差分布计算模型

3.1 屏式过热器热力参数及结构介绍

河曲电厂以及白马电厂中屏式过热器不同稳定运行负荷下的热力参数如表 3、4 所示。

河曲电厂屏式过热器共 6 片，布置在靠近前墙炉膛上部，且在左右方向上居于左侧墙与炉膛中心线的中间位置，过热器为膜式结构，管子规格为 $\phi 63.5\text{mm} \times 11.5\text{mm}$ ，材料为 SA-213TP347HG，节距

表 3 河曲电厂屏式过热器热力参数

Table 3 Thermal parameters of
platen superheaters in Hequ Power Plant

项目	流量	进口压力	出口压力	进口温度	出口温度
	$G/(t/h)$	$P_{in}/MPa(g)$	$P_{out}/MPa(g)$	$T_{in}/^{\circ}C$	$T_{out}/^{\circ}C$
350MW	1046.8	23.71	23.11	512.94	563.79
270MW	812	23.22	22.95	510.53	567.03
220MW	679.05	20.75	20.64	504.89	564.78
40MW	158.05	7.44	7.32	413.06	485.78

表 4 白马电厂屏式过热器热力参数

Table 4 Thermal parameters of
platen superheaters in Baima Power Plant

项目	流量	进口压力	出口压力	进口温度	出口温度
	$G/(t/h)$	$P_{in}/MPa(g)$	$P_{out}/MPa(g)$	$T_{in}/^{\circ}C$	$T_{out}/^{\circ}C$
588MW	1792.7	23.53	23.1	500.86	566.3
480MW	1427.8	20.54	20.3	489.33	567.6
355MW	1083.4	16.135	15.9	480.48	566.4
120MW	721.6	9.85	9.7	357.6	453.9

为 76.2mm。6 片管屏采用并联布置方式保证蒸汽的质量流速。在屏式过热器下部转弯区域范围内设置耐磨材料，整个过热器内工质从下自上进行换热。

白马电厂屏式过热器布置在炉膛上部左右 2

侧，单侧布置有 8 片屏式过热器，单侧 8 片屏式过热器并联布置，两侧共 16 片屏式过热器。屏式过热器为膜式结构，管子规格 $\phi 50.8mm \times 11.5mm$ ，节距为 63.5mm，材料为 SA-213TP347H。

3.2 汽水流程与管段划分

过热蒸汽从屏式过热器入口集箱进入，经过由光管组成的管屏，进入到屏式过热器出口集箱，2 电厂中屏式过热器汽水流程相同。

为准确计算压力、温度及焓值沿管长的变化特性将每一个回路沿工质流动方向划分为若干个管段，其中将过热器炉膛外的不受热管子划分为 1 个管段，炉膛内倾角为 5°水平受热管段划分为 1 个管段，销钉区域的垂直管段划分为 1 个管段，炉膛外

不受热管划分为 1 个管段。对于河曲电厂来说，将销钉区以上未敷设耐磨材料以下的部分共分为 5 个管段，未敷设耐磨材料的垂直管划分为 20 个管段。对于白马电厂来说，将销钉区以上未敷设耐磨材料以下的部分共分为 5 个管段，未敷设耐磨材料的垂直管划分为 8 个管段。图 2 示出了 2 电厂部分典型回路的管段划分，图中虚线为敷设耐磨材料的部分。

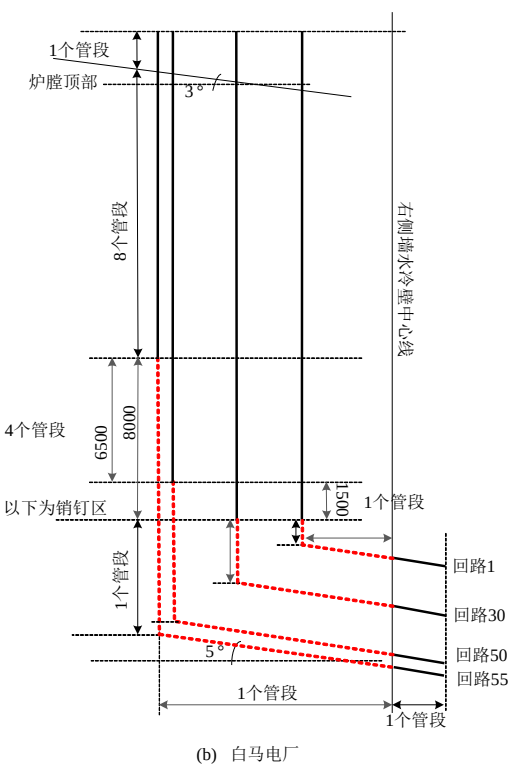
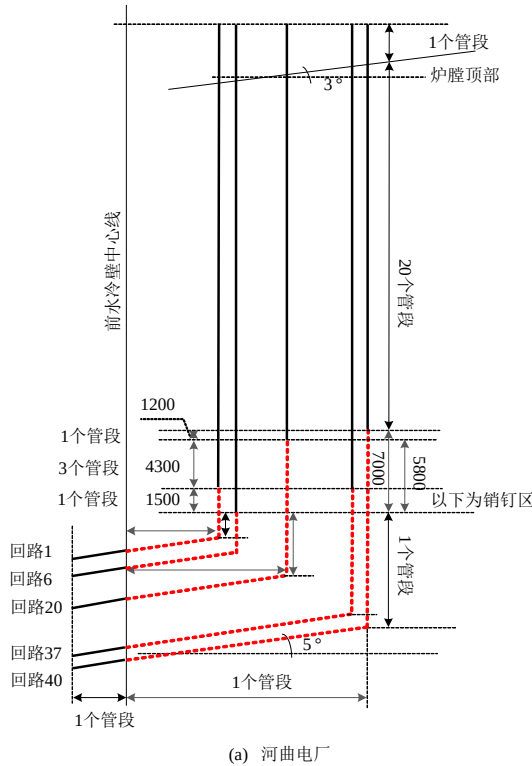


图 2 管段划分

Fig. 2 Longitudinal section divis

3.3 建立闭合方程组

流量分配的非线性计算模型由描述节点(集箱)流量情况的质量守恒方程、描述回路管段压降情况

的动量守恒方程以及描述各管段吸热量情况的能量守恒方程组成。根据 3 种守恒方程所建立的闭合方程组，计算得到各回路的流量及节点压力等参数。

2 电厂屏式过热器回路节点划分示意图分别如图 3、4 所示。河曲电厂屏式过热器中 40 根管子布有 40 个测温点, 故将每根管子划分为 1 个回路, 共 40 个回路。

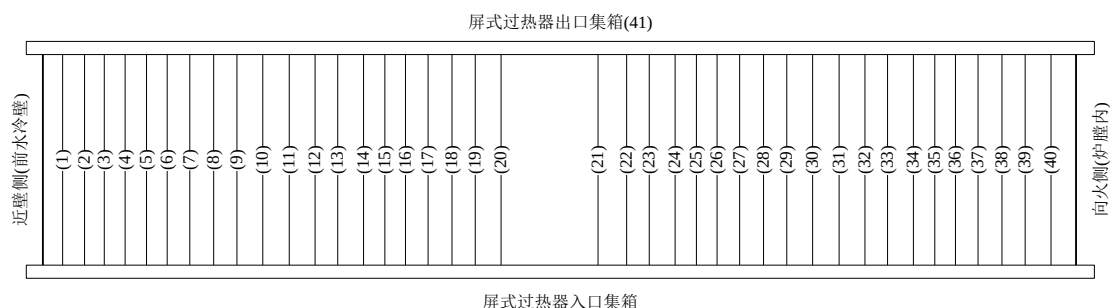


图 3 河曲电厂屏式过热器流动网络示意图

Fig. 3 Flowing network system of platen superheaters in Hequ Power Plant



图 4 白马电厂屏式过热器流动网络示意图

Fig. 4 Flowing network system of platen superheaters in Baima Power Plant

以河曲电厂回路节点划分为例, 列出压力、流量平衡方程。

1) 压力平衡方程。

回路各管段压降总和与此回路进出口节点的压力差相等。方程(1)(2)是压力平衡方程:

$$\Delta P_i = \phi_i[x(i)], \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$0 = P(\text{innode}) - P(\text{outnode}) - \Delta P(i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$0 = P(41) - P_0 - \Delta P(i), \quad i = 1 - 40 \quad (3)$$

方程(3)给出了屏式过热器的压降平衡方程。 P_0 为屏式过热器入口集箱压力, Pa。

2) 流量平衡方程。

流入节点的流量等于流出节点的流量。

$$0 = \sum[x(i)_{\text{in}}] - \sum[x(i)_{\text{out}}], \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

方程(4)给出了第 i 号节点的质量守恒方程。

$$0 = w(41) - \sum_{i=1}^{40} w(i) \quad (5)$$

方程(5)给出了节点 41 质量守恒的方程。

3.4 高温过热器热负荷分布

循环流化床锅炉采用多次循环的燃烧方式, 会形成高浓度区域, 与常规煤粉炉不一样, 因此耐磨材料对于确保锅炉的安全、可靠运行极为重要。敷

个回路。白马电厂屏式过热器中 55 根管子布有 55 个测温点, 故将每根管子划分为 1 个回路, 共 55 个回路。

设耐磨材料区域的热负荷采用以耐磨层当量厚度为基础的平板换热计算模型^[22]。图 5 为在管外加耐磨材料之后的传热计算示意图, 可知壁面热负荷 q 可通过如下方程计算:

$$q = \frac{t_a - t_i}{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta_{nm}}{\lambda_{nm}} + \frac{\delta_{js}}{\lambda_{js}} + \frac{1}{h_i} + R_{tc}} \quad (6)$$

式中: q 为沿径向的线性热负荷, W/m^2 ; t_a 为烟气温度, $^{\circ}\text{C}$; t_i 为管内工质温度, $^{\circ}\text{C}$; h_e 为烟气侧换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$; h_i 为工质侧换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$; λ_{nm} 为耐磨材料导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$; λ_{js} 为水冷壁管

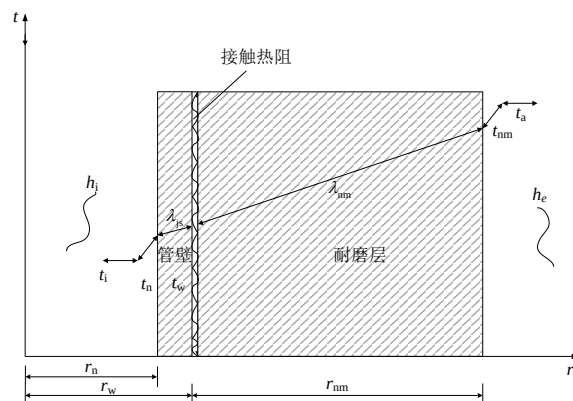


图 5 耐磨材料传热示意图

Fig. 5 Heat transfer of wear-resistant materials

导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$; δ_s 为管壁厚, m ; δ_{hm} 为耐磨层当量厚度, m , 按式(13)计算; R_{tc} 为接触热阻, $\text{m}^2\cdot\text{k}/\text{W}$ 。

对流换热系数以及辐射换热系数^[20]按下式进行计算:

$$h_c = C \times \left(\frac{1}{d}\right)^{0.2} \times \left(\frac{5}{9T_{avg} + 160}\right)^{0.181} \times \Delta t^{0.266} \times \sqrt{1 + 0.794 \times v_{wind}} \quad (7)$$

式中: h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$; C 为形状因子; d 为圆柱直径, m ; T_{avg} 为平均空气膜温度, $^{\circ}\text{C}$; Δt 为外表面与空气的温差, $^{\circ}\text{C}$; v_{wind} 为风速, km/h ;

$$T_{avg} = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (8)$$

$$\Delta t = T_s - T_a \quad (9)$$

式中: T_s 为外表面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$h_r = \left\{ \frac{E \times \sigma \times [(T_a + 459.6)^4 - (T_s + 459.6)^4]}{T_a - T_s} \right\} \quad (10)$$

式中: h_r 为辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$; E 为有效辐射发射率; σ 为黑体辐射常数。

对屏式过热器中敷设耐磨材料后的热负荷计算的传热模型作了一些简化:

1) 耐磨浇注料以及火焰侧的换热系数一般取 $he=180\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$ 左右。

2) 本次计算取耐磨材料导热系数为 $3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 。

3) 考虑浇注料与金属之间不能良好接触的热阻, 此处接触热阻取为 $0.006\text{m}^2\cdot\text{k}/\text{W}$ 。

4) 计算取屏式过热器处的烟气温度取为 850°C 。

未敷设耐磨材料区域的管段热负荷通过热量平衡方程计算。图6给出了河曲电厂循环流化床锅炉在满负荷运行时炉膛沿高度方向的热负荷曲线。

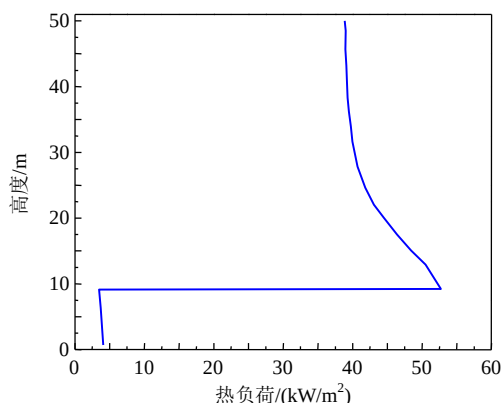


图6 炉膛热负荷曲线

Fig. 6 Thermal load curve of boiler furnace

3.5 屏式过热器进口分配集箱静压分布

屏式过热器的工质由分配集箱流入到各并联管屏内。由于集箱有一定的长度, 需要考虑管屏入口处集箱静压分布是不均匀的。计算并联管组中流量分配的关键技术是确定集箱中的静压分布^[23]。某负荷下的静压差的值即为不同回路进口端工质压力与联箱进口压力之差。

3.6 热偏差系数及吸热量计算方法

根据屏式过热器的结构及其热力参数建立水动力模型, 通过假定的热负荷使用水动力计算程序进行计算, 将计算所得到不同回路出口汽温结果与实炉测量数据进行对比分析, 若二者汽温偏差 $\leq \pm 2\%$, 则认为所假定的屏式过热器中沿炉深方向的热偏差为真实热偏差, 进而通过假定的回路的热负荷等参数计算得到不同回路吸热量及热偏差系数, 若二者气温偏差不符合要求, 则重新假定热负荷进行计算, 直到计算结果的出口汽温与实炉测量数据精度满足要求。式(11)为热偏差系数计算公式^[19]。

$$\eta_i = \frac{\Delta h_{s,i}}{\Delta h_{avg}} \quad (11)$$

式中: η_i 为 i 回路的热偏差系数; $\Delta h_{s,i}$ 为假定的 i 回路的焓增, kJ/kg ; Δh_{avg} 为屏式过热器的平均焓增, kJ/kg 。

其中 Δh 的计算方法为公式(12)。

$$\Delta h = \frac{qH}{G} \quad (12)$$

式中: q 为管子热负荷, kW/m^2 ; H 为受热面积, m^2 ; G 为工质质量流量, kg/s 。

根据所计算出来的热偏差系数, 则可根据公式计算出回路的吸热量, 从而得到屏式过热器吸热量的分布特性。吸热量计算公式如式(13)所示。

$$Q_i = \Delta h_{s,i} G_i \quad (13)$$

式中: Q_i 为 i 回路的吸热量, kW ; G_i 为 i 回路质量流量, kg/s 。

4 屏式过热器吸热量偏差分布计算结果与分析

4.1 出口汽温分布

2 电厂屏式过热器不同管子实际炉内测量数据与计算结果数据对比曲线分别如图7、8所示。2 电厂偏差均可满足精度要求。河曲电厂实炉测量数据与计算结果最小温度偏差为 -0.02% , 最大温度偏差

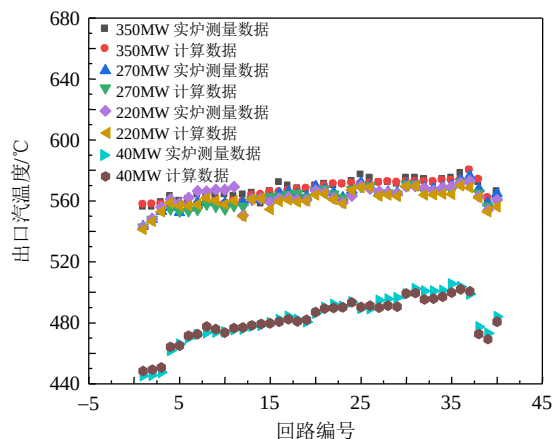


图7 河曲电厂实际测量数据与计算结果

Fig. 7 Comparison between the calculated and measured outlet steam temperatures in Hequ Power Plant

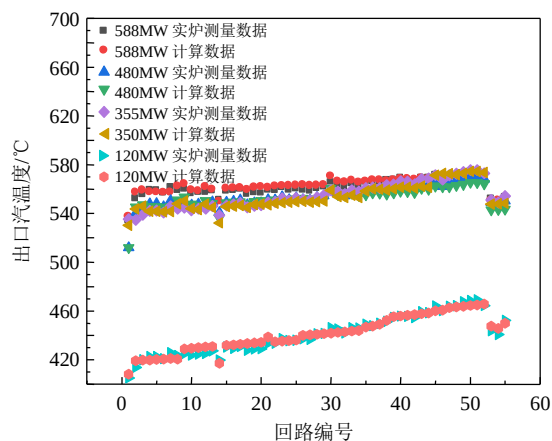


图8 白马电厂实际测量数据与计算结果

Fig. 8 Comparison between the calculated and measured outlet steam temperatures in Baima Power Plant

为 1.17%。白马电厂实炉测量数据与计算结果最小温度偏差为-0.01%，最大温度偏差为 1.29%。

由图 7 可知，河曲电厂 350MW 负荷下，屏式过热器全屏汽温偏差最大值为 23.5℃，近壁侧出口汽温偏差较小，为 11.3℃，在距离前水冷壁中心线 3.73m 处，出口汽温达到最大，近火侧出口汽温偏差为 18.2℃。

270MW 负荷下，高温过热器全屏汽温偏差最大值为 29.9℃，近壁侧与近火侧出口汽温偏差分别为 24℃、16℃。

220MW 负荷下，高温过热器全屏汽温偏差最大值为 26.8℃，近壁侧与近火侧出口汽温偏差分别为 26.09℃、16.93℃。

40MW 时，高温过热器全屏汽温偏差最大值为 53.56℃，近壁侧与近火侧出口汽温偏差分别为 38.61℃、32.67℃。

由图 8 可知，白马电厂在 588MW 负荷下，屏

式过热器全屏汽温偏差最大值为 33.9℃，近壁侧出口汽温偏差为 26.8℃，近火侧出口汽温偏差为 21℃。

480MW 负荷时，屏式过热器全屏汽温偏差最大值为 28.2℃，近壁侧与近火侧出口汽温偏差分别为 16.88℃、22.21℃。

355MW 负荷下，屏式过热器全屏汽温偏差最大值为 44.4℃，近壁侧与近火侧出口汽温偏差分别为 33℃、27℃。

120MW 负荷下，屏式过热器全屏汽温偏差最大值为 56.9℃，近壁侧与近火侧出口汽温偏差分别为 32.4℃、24℃。

4.2 管壁温度分布

河曲电厂选取屏式过热器中受热最强且管内流量较低的最危险的 37 回路进行 350MW 负荷下壁温分布分析。白马电厂选取屏式过热器中受热最强且管内流量较低的最危险 50 回路进行 588MW 负荷下壁温分布分析。壁温沿管子高度分布分别如图 9、10 所示。

由图可知，过热器入口段和出口段均不受热，

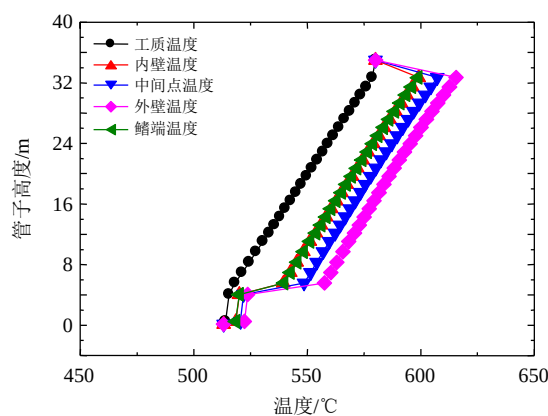


图9 第37回路壁温分布

Fig. 9 Wall temperature distribution of 37th loop

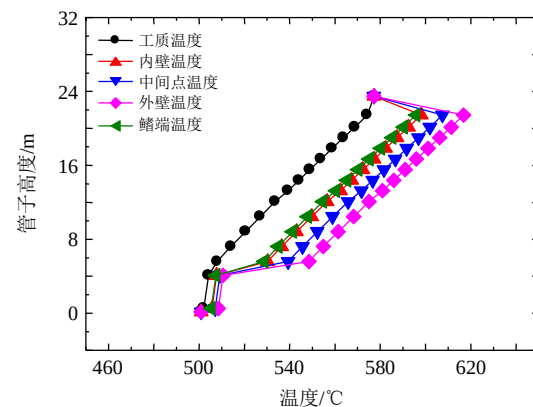


图10 第50回路壁温分布

Fig. 10 Wall temperature distribution of 50th loop

故壁温与蒸汽温度相同。在满负荷下,过热器底部敷有耐磨层,故热负荷较小,温度变化不大;随着过热器高度增加,壁温随汽温的增大而增加。由计算结果可知,河曲电厂中过热器最高外壁温度为 615.6°C ,白马电厂中过热器最高外壁温度为 618°C 。可以看出,2电厂屏式过热器壁温均在材料的允许范围内,可以保证过热器安全可靠运行。

4.3 屏式过热器热吸热量偏差分布计算结果

循环流化床锅炉炉膛中气体与固体颗粒之间质量、热量传递以及炉内燃烧物与受热面之间的传热均与炉膛内气固的强烈混和有着密不可分的联系,二者的有效混合对炉内均匀燃烧、稳定操作有至关重要的作用^[24]。为了满足锅炉蒸汽要求以及负荷要求,在炉膛内布置的屏式过热器等受热面会对炉内颗粒的混合产生不利影响。屏式受热面不均匀换热、局部超温、不均匀燃烧和污染排放等诸多问题均是由气固两相流不均匀分布而影响炉膛壁面的气固流动造成的。故对炉膛内布置的屏式受热面的热偏差以及吸热量的研究成为循环流化床锅炉研发中的重要问题。

河曲电厂炉膛中屏式过热器回路热偏差系数曲线如图 11 所示;不同回路吸热量分布曲线如图 12 所示。

根据计算结果可知,在河曲电厂 350MW 超临界 CFB 锅炉的屏式过热器在满负荷运行中,近壁侧的热偏差系数较小,吸热量较小,随着距前墙水冷壁中心线的距离增大,热偏差系数逐渐增加,吸热量也逐渐增加,并在距离前水冷壁中心线 3.73m 处,热偏差系数达到最大,为 1.16,吸热量达到最大,为 248.13kW,并在近火侧管子热偏差系数降低。270MW 时,在距离前墙水冷壁中心线 3.66m 的距

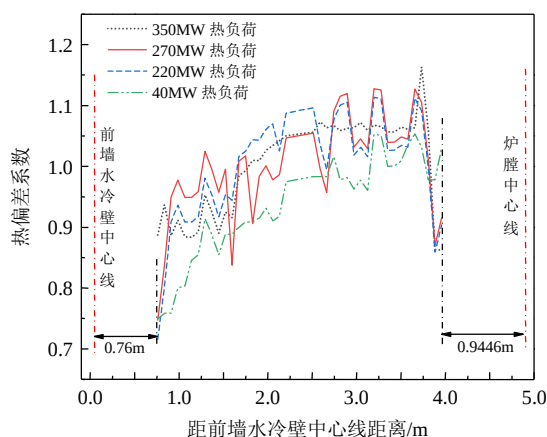


图 11 热偏差系数

Fig. 11 Heat absorption deviation

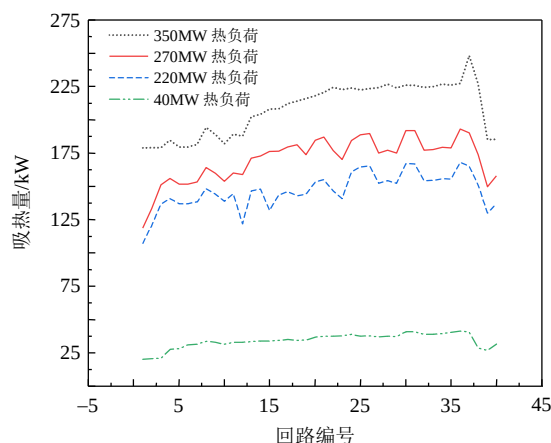


图 12 屏式过热器吸热量分布曲线

Fig. 12 Distribution curve of heat absorption

离处,热偏差系数达到最大,为 1.12,吸热量达到最高,为 193.14kW。220MW 时,在距离前墙水冷壁中心线 3.66m 的距离处,热偏差系数达到最大,为 1.11,吸热量达到最高,为 167.86kW。40MW 时,在距离前墙水冷壁中心线 3.73m 的距离处,热偏差系数达到最大,为 1.05,吸热量达到最高,为 41.31kW。

白马电厂炉膛中屏式过热器回路热偏差系数曲线如图 13 所示;不同回路吸热量分布曲线如图 14 所示。

在白马电厂 600MW 超临界 CFB 锅炉的屏式过热器在满负荷运行中,近壁侧的热偏差系数较小,吸热量较少,随着距右侧墙水冷壁中心线的距离增大,热偏差系数逐渐增加,吸热量也逐渐增加,并在距离右侧墙水冷壁中心线 2.64m 处,热偏差系数达到最大,为 1.1,在距离右侧墙水冷壁中心线 3.9m 的距离处,吸热量达到最大,为 136.69kW,并在近火侧管子热偏差系数降低。480MW 负荷时,热偏差系数最大为 1.1,吸热量最高为 121.39kW。

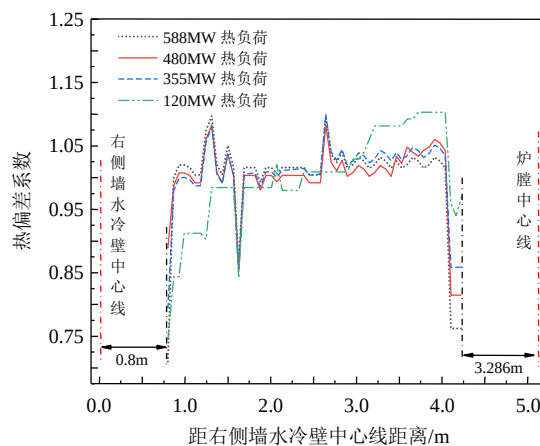


图 13 热偏差系数

Fig. 13 Heat absorption deviation

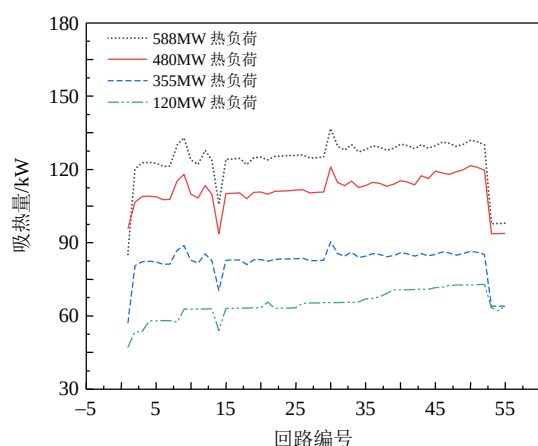


图14 屏式过热器吸热量分布曲线

Fig. 14 Distribution curve of heat absorption

355MW 负荷时,热偏差系数最大为 1.1,吸热量最高为 90.39kW。120MW 负荷时,热偏差系数最大为 1.1,吸热量最高为 72.93kW。

由图可以看出,两电厂中屏式过热器热偏差系数以及吸热量分布趋势大致相同,在靠近前(右侧)墙水冷壁中心线的热偏差系数较小,吸热量较少,随着与前(右侧)墙水冷壁中心线的距离增加,热偏差系数逐渐增加,吸热量增多,且热偏差系数有小幅度的波动,并趋于平缓,在靠近炉膛中心线处,热偏差系数以及吸热量又降低。

5 结论

根据超临界 CFB 锅炉炉膛内屏式过热器流动网络系统所建立数学模型以及吸热量与热偏差计算模型,计算分析得到锅炉炉膛内屏式过热器的吸热量偏差分布规律。

由计算结果可得:

1) 2 个电厂不同负荷下炉膛内屏式过热器热偏差系数以及吸热量分布趋势相同,均为靠近前(右侧)墙水冷壁中心线的热偏差系数较小,吸热量较少,且热偏差系数有小幅度的波动,随着与前(右侧)墙水冷壁中心线的距离增加,热偏差系数逐渐增加,吸热量增多,并在靠近炉膛中心线处,热偏差系数及吸热量均减小。

2) 屏式过热器中间位置处的管子热偏差系数较大,吸热量较多,而处于靠近侧壁位置处过热器管子的热偏差系数较小,吸热量较少,这是由于过热器在靠近边壁的区域,气固之间的混合以及两相流动的剧烈程度远不如中间的区域,处于中部的受热管在前(右侧)墙水冷壁和屏式过热器的作用下,烟气侧颗粒悬浮密度比较高,对流传热较强,

远远大于辐射传热,故此处的热偏差系数较大,吸热量较多,而在靠近水冷壁和炉膛的管子,炉内颗粒浓度较低,对流换热系数较小,几乎只有辐射传热,故在此处热偏差系数较小,吸热量较少。

3) 由结果可知,随着热负荷的减小,过热器热偏差系数波动范围有小幅减小,吸热量也逐渐减小,说明在超临界 CFB 锅炉的运行中,锅炉运行负荷越低,偏差越小,均匀性越强,这对锅炉低负荷运行和调峰工况下是有利的。故在满负荷工况下所提供的优化改造方案若满足要求,则在低负荷工况下同样也满足要求。

4) 通过对屏式过热器中管子吸热量及热偏差的分布规律的分析研究为超(超)临界 CFB 锅炉中高温过热器及高温再热器优化改造提供了理论依据。研究结果对超(超)临界 CFB 锅炉优化设计及安全运行具有重要意义。通过计算所得汽温偏差以及吸热量偏差分布规律,可在汽温偏差较高的地方敷设耐磨材料,降低该管段处热负荷,从而有效降低屏式过热器的出口汽温以及吸热量偏差;在出口汽温较低即吸热量较小的管段设置节流圈,增加管段的阻力,减小流量,降低屏式过热器出口汽温偏差;在吸热量较小的管子处减小管子管径或变径,减小流量,增加管子的出口汽温,减小屏式过热器的出口汽温偏差;可以通过高温过热器、高温再热器采用分级设计的方案,减小每级受热面焓增以降低汽温偏差。

参考文献

- [1] LI Dongfang, KE Xiwei, ZHANG Man, et al. A comprehensive mass balance model of a 550 MWe ultra-supercritical CFB boiler with internal circulation[J]. Energy, 2020, 206: 117941.
- [2] 凌文, 吕俊复, 周托, 等. 660MW 超超临界循环流化床锅炉研究开发进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2515-2523.
LING Wen, LV Junfu, ZHOU Tuo, et al. Research and development progress of the 660MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2515-2523(in Chinese).
- [3] CAI Runxia, KE Xiwei, LYU Junfu, et al. Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China: a review[J]. Clean Energy, 2017, 1(1): 36-49.
- [4] 茹宇, 许杰, 任朝晖, 等. 循环流化床锅炉分离器中心筒改造对锅炉性能的影响[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 26-31.

- RU Yu, XU Jie, REN Chaohui, et al. Effect of retrofitting of separator vortex finder on CFB boiler's performance [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 26-31(in Chinese).
- [5] 赵鹏勃, 茹宇, 王鹏利, 等. CFB 锅炉燃烧生物质及 RDF 燃料的广谱污染物排放研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2201-2211.
- ZHAO Pengbo, RU Yu, WANG Pengli, et al. Study on broad spectrum pollutant emission of CFB boiler burning biomass and RDF fuel[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2201-2211(in Chinese).
- [6] 董乐, 辛亚飞, 李娟, 等. 660MW 超超临界循环流化床锅炉水动力及流动不稳定特性计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1545-1553.
- DONG Le, XIN Yafei, LI Juan, et al. Computational analysis on thermal-hydraulic characteristics and flow instability of a 660MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1545-1553(in Chinese).
- [7] YANG Ming, DUAN Liqiang, TONG Yongjing. Design and performance analysis of new ultra-supercritical double reheat coal-fired power generation systems[J]. Energies, 2021, 14(1): 238.
- [8] 蔡润夏, 吕俊复, 凌文, 等. 超(超)临界循环流化床锅炉技术的发展[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 1-7.
- CAI Runxia, LV Junfu, LING Wen, et al. Progress of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology[J]. Electric Power, 2016, 49(12): 1-7(in Chinese).
- [9] 张鹏, 范浩东, 余耀, 等. 350MW 超临界 CFB 锅炉不同负荷下性能试验研究[J/OL]. 洁净煤技术, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JJMS20210125000&v=zFgFmBHRGGheX0v7NwHcUQpnz2B15BVpG3Zs91E2UaOVTrDxzAIXXXV4YiMSN7B9>. 2021.9.10.
- ZHANG Peng, FAN Haodong, YU Yao, et al. Research on the performance of 350MW supercritical circulating fluidized bed boiler under different loads[J/OL]. Clean Coal Technology, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JJMS20210125000&v=zFgFmBHRGGheX0v7NwHcUQpnz2B15BVpG3Zs91E2UaOVTrDxzAIXXXV4YiMSN7B9>. 2021.9.10. (in Chinese).
- [10] 肖波. 电站锅炉过热器超温爆管原因分析[J]. 广东化工, 2018, 45(17): 97-98.
- XIAO Bo. Analysis of superheater tube failure caused by high temperature creep[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(17): 97-98(in Chinese).
- [11] 张彦军, 杨春, 程乐鸣, 等. 循环流化床锅炉炉内屏式过热器蠕变破裂预测[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(35): 35-40.
- ZHANG Yanjun, YANG Chun, CHENG Leming, et al. Creep rupture time predication of a superheater wall in a circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(35): 35-40(in Chinese).
- [12] 吴海波. 大型循环流化床锅炉扩展受热面关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2013.
- WU Haibo. Research on the key technology of extended heating surface of large-scale circulating fluidized bed boiler[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2013(in Chinese).
- [13] NAG P K, MORAL M A N. Effect of probe size on heat transfer at the wall in circulating fluidized beds[J]. International Journal of Energy Research, 1990, 14(9): 965-974.
- [14] LI Dongfang, KIM K, KIM M, et al. Effects of particle size on bed-to-surface heat transfer in bubbling fluidized bed heat exchangers of 550 MWe ultra-supercritical CFB boiler[J]. Energy, 2021, 222: 119889.
- [15] DWIVEDI K K, DUTTA S, LOHA C, et al. A numerical study on the wall erosion impact and gas-particle hydrodynamics in circulating fluidized bed riser[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 22: 100852.
- [16] 姜峰, 沈宇, 齐国鹏, 等. 液-固循环流化床锅炉中的颗粒分布[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2021, 54(6): 607-616.
- JIANG Feng, SHEN Yu, QI Guopeng, et al. Particle distribution in liquid-solid circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2021, 54(6): 607-616(in Chinese).
- [17] 程竹静, 管坚. 300MW 循环流化床锅炉屏式过热器传热特性及壁温研究[J]. 节能技术, 2013, 31(5): 413-416.
- CHENG Zhujing, GUAN Jian. Study on the heat transfer characteristic and wall temperature of platen superheater in a 300MW CFB boiler[J]. Energy Conservation Technology, 2013, 31(5): 413-416(in Chinese).
- [18] 吴海波, 张缦, 孙运凯, 等. 300MW 循环流化床锅炉屏式受热面传热系数计算及其变化规律[J]. 动力工程学报, 2012, 32(8): 586-590, 611.
- WU Haibo, ZHANG Man, SUN Yunkai, et al. Calculation and variation of heat-transfer coefficient of platen heating surfaces in a 300 MW CFB boiler[J]. Journal of Chinese

- Society of Power Engineering, 2012, 32(8): 586-590, 611(in Chinese).
- [19] 张鹏, 贺建平, 王虎, 等. 350MW 循环流化床锅炉屏式受热面汽温偏差研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 126-131.
- ZHANG Peng, HE Jianping, WANG Hu, et al. Study on steam temperature deviation of platen heating surface in a 350 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 126-131(in Chinese).
- [20] 李银龙, 董乐, 牛田田, 等. 660MW 超临界 CFB 锅炉机组跳闸后受热面安全性计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5957-5965.
- LI Yinlong, DONG Le, NIU Tiantian, et al. Calculation and analysis on the safety of heating surfaces for a 660MW supercritical CFB boiler under boiler trip[J]. 2021, 41(17): 5957-5965.(in Chinese).
- [21] 车得福, 庄正宁, 李军, 等. 锅炉[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 251-263.
- CHE Defu, ZHUANG Zhengning, LI Jun, et al. Boiler [M]. Version 2. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008: 251-263.
- [22] 黄永志. 循环流化床锅炉水动力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- HUANG Yongzhi. Research on water circulation characteristics of evaporating system in CFB boiler[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016(in Chinese).
- [23] 杨冬, 陈听宽, 李会雄, 等. 锅炉过热器与再热器流量分配的非线性数学模型及壁温计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 38-42.
- YANG Dong, CHEN Tingkuan, LI Huixiong, et al. Nonlinear mathematical model for flow rate distribution in the parallel tubes of boiler superheater/reheater and the calculation method of tube surface temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 38-42(in Chinese).
- [24] 程乐鸣, 许霖杰, 夏云飞, 等. 600MW 超临界循环流化床锅炉关键问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5520-5532.
- CHENG Leming, XU Linjie, XIA Yunfei, et al. Key issues and solutions in development of the 600MW CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5520-5532(in Chinese).



牛田田

在线出版日期: 2021-11-08。

收稿日期: 2021-06-03。

作者简介:

牛田田(1996), 女, 工学硕士, 主要从事多相流流动及传热计算, 锅炉水动力研究的工作, 13622060665@163.com;

*通信作者: 杨冬(1967), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事多相流与传热、超(超)临界锅炉水动力、高效紧凑式换热器开发, dyang@mail.xjtu.edu.cn。

(编辑 邵泽亮)

Study on the Heat Absorption Deviation Characteristics of the Platen Superheaters in the Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler

NIU Tiantian¹, ZHANG Weiqiang², XIN Shengwei³, LI Qiang², WANG Hu³, CAO Peiqing³,
YANG Haoyu¹, NIE Chao¹, YANG Dong¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering (Xi'an Jiaotong University); 2. Clean Energy Research Institute of China Huaneng Group; 3. CHN Energy CFB Technology R&D Center)

KEY WORDS: supercritical circulating fluidized bed boiler; platen heating surface; hydrodynamic characteristics; heat absorption; thermal deviation coefficient

As a technology with comprehensive advantages, supercritical circulating fluidized bed (CFB) combustion technology is widely used. However, the leakage of the platen superheaters in the furnace frequently occurs, so it is necessary to research and analysis of thermal-hydraulic characteristics and heat absorption characteristics.

This paper according to the mathematical model of the complex flow network system established by the platen superheaters of the supercritical CFB boiler, and the actual furnace measurement data of the temperature distribution of the platen superheaters, the heat load is inversely deduced. The flow distribution, outlet steam temperature distribution and wall temperature characteristics of the platen superheaters in the 350MW supercritical CFB boiler of Hequ Power Plant and the 600MW supercritical CFB boiler of Baima Power Plant are calculated, and the heat absorption distribution and the thermal deviation coefficient distribution are calculated.

The schematic diagram of the node division of the panel superheater loop of the Hequ Power Plant is shown in Fig. 1.

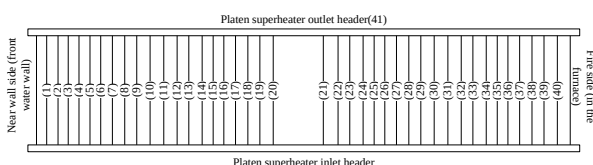


Fig. 1 Flowing network system of platen superheaters in Hequ Power Plant

According to the mobile network system diagram, list the pressure and flow balance equations.

Pressure balance equation

The total pressure drop of each pipe section of the loop is equal to the pressure difference at the inlet

and outlet nodes of the loop.

$$\Delta P_i = \phi_i [x(i)], \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$0 = P(\text{innode}) - P(\text{outnode}) - \Delta P(i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$0 = P(41) - P_0 - \Delta P(i), \quad i = 1 - 40 \quad (3)$$

P_0 -The inlet header pressure, Pa.

The thermal deviation coefficient curve of the panel superheater loop in the furnace of Hequ Power Plant is shown in Fig. 2.

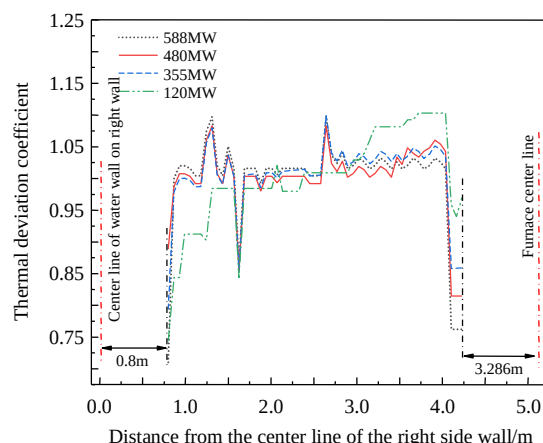


Fig. 2 Distribution curve of heat absorption

The calculation results show that the heat absorption and thermal deviation coefficient of the platen heating surface are smaller on the near wall side and the fire side, and the two are larger in the middle of the heating surface. This is due to the difference in the concentration of smoke particles. The analysis and research on the distribution law of heat absorption and thermal deviation of the tube in the panel superheater provides a theoretical basis for the optimization and transformation of the high-temperature superheater and high-temperature reheater in the super (super) critical CFB boiler. The research results are of great significance to the optimal design and safe operation of ultra (super) critical CFB boilers.