

600 MW 超超临界循环流化床锅炉水冷壁传热特性研究

李耀德,董 乐,李 娟,杨 冬

(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:为获得超超临界压力下 CFB 锅炉水冷壁内、外传热特性,建立了水冷壁总传热系数计算模型,并通过高温高压条件下的实验数据拟合得到了工质侧传热系数关联式,将此关联式代入水冷壁总传热系数计算模型,使其预测精度大为提高。研究结果表明:水冷壁传热性能是工质侧传热系数、烟气侧传热系数以及水冷壁管导热性能耦合作用的结果;工质侧传热系数沿着炉膛高度的增加而增加,在 30 m 时出现第一次峰值,后墙、中隔墙和侧墙水冷壁传热系数分别为 24.7,25.9 和 27.3 kW/(m²·K),而且在此区间内波动剧烈,并在 52 m 附近达到最大值,后墙、中隔墙和侧墙水冷壁传热系数分别为 33.8,35.1 和 36.2 kW/(m²·K),超过 50 m 以上区域则迅速下降;在 100% BMCR 负荷下,水冷壁总传热系数沿着炉膛高度方向减小,在 30 m 以下区域,中隔墙、后墙、侧墙水冷壁总传热系数分别从 220,215.2 和 213 W/(m²·K)下降到了 178,174 和 170 W/(m²·K),而在 30 m~50 m 区间仅下降了 4~5 W/(m²·K),在炉膛顶部区域总传热系数几乎不变。

关 键 词:超超临界;CFB 锅炉;总传热系数

中图分类号:TK223.3

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.06.013

[引用本文格式]李耀德,董 乐,李 娟,等.600 MW 超超临界循环流化床锅炉水冷壁传热特性研究[J].热能动力工程,2021,36(6):86-93. LI Yao-de, DONG Le, LI Juan, et al. Study on water wall heat transfer characteristics of 600 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6): 86-93.

Study on Water Wall Heat Transfer Characteristics of 600 MW Ultra-Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler

LI Yao-de, DONG Le, LI Juan, YANG Dong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: In order to obtain the internal and external heat transfer characteristics of the CFB boiler water-cooled wall under ultra-supercritical pressure, a calculation model for the total heat transfer coefficient of the water-cooled wall was established, and through the experimental data under high temperature and high pressure conditions, the correlation of the heat transfer coefficient on the working fluid side is obtained. This correlation is substituted into the calculation model of the total heat transfer coefficient of the water wall, which greatly improves the prediction accuracy. The research results show that the heat transfer performance of the water wall is the result of the coupling of the heat transfer coefficient on the working side, the heat transfer coefficient on the flue gas side, and the thermal conductivity of the water wall; The heat transfer coefficient on the working side increases along with the increase of the furnace height, and the first peak appears at 30 m and fluctuates violently. The heat transfer coefficients of the water walls of the rear wall, middle partition wall and side wall are 24.7, 25.9 and 27.3 kW/(m²·K). The maximum value is reached near 52 m, where the heat transfer coefficients of the back wall, middle partition wall and

side wall are 33.8, 35.1 and 36.2 kW/(m² · K). For the area over 50 m, they will drop rapidly. At 100% BMCR load, the total heat transfer coefficient decreases along the height of the furnace. In the area below 30 m, the total heat transfer coefficients of the back wall, side walls, and partition walls have decreased from 220, 215.2 and 213 W/(m² · K) to 178, 174 and 170 W/(m² · K). But in the range of 30 m ~ 50 m, it only falls by 4 ~ 5 W/(m² · K), with the total heat transfer coefficient in the top area of the furnace almost unchanged.

Key words: Ultra-Supercritical, CFB boiler, total heat transfer coefficient

引言

循环流化床(Circulating Fluidized Bed, CFB)锅炉具有其它炉型难以比拟的优势:高效燃烧,有助于降低运行成本;适宜的炉膛温度和炉内脱硫方式,能够解决污染物排放问题;广泛的煤种适应能力,可以实现多种低品质燃料混合燃烧^[1-3]。因而,发展高参数、大容量超超临界循环流化床锅炉是目前解决中国能源瓶颈的最佳途径^[4-5]。

在 CFB 锅炉中,燃料的化学能以对流和辐射的方式传递给水冷壁,再以热传导的方式传递给锅内工质。由于炉内气-固两相流场分布不均,特别是受到底部松动风的影响,炉内固相颗粒沿着垂直方向形成了密相、稀相、烟气等不同区域分布,导致不同区域内水冷壁表面传热特性明显不同。因此,国内外不少学者对 CFB 锅炉传热特性开展了相关研究。索疆舜等人^[6]在 300 MW CFB 锅炉内稀相区传热特性研究中发现:锅炉传热系数与锅炉负荷密切相关。当负荷升高时,对流换热系数沿着炉高方向减小,而辐射传热系数随着炉高方向增大。吴海波^[7]开展了 300 MW CFB 锅炉扩展受热面传热特性的研究并指出:95% 锅炉最大连续蒸发量(Boiler Maximum Continuous Rating, BMCR)工况下锅炉传热系数在 155 ~ 175 W/(m² · K)之间,50% BMCR 负荷下传热系数在 100 ~ 120 W/(m² · K)之间。周鸿波等人^[8]提出了一种简化的、基于经验数据的 CFB 热力计算模型,建立了理论计算与工程分析之间的桥梁。许霖杰^[9-10]在模拟计算中发现水冷壁表面传热系数与截面固相浓度具有较强的关联性,采用常规“大表面”传热计算模型难以准确描述 CFB 锅炉传热特性,需要增加固相浓度修正。重庆大学提出了一种“炉膛包围分离器”^[11]的新型 CFB 锅炉布置方案,并在冷态工况下进行了数值模拟,取得了较好的效果。但是整体来说,高参数 CFB 锅炉

水冷壁内、外传热机理尚不太明确,尤其在烟气侧、受热面本身和工质侧传热特性耦合机理方面的研究较少。

本文构建了水冷壁两侧以及水冷壁本身的传热系数数学模型,并以一台 600 MW 超超临界 CFB 锅炉为例,分别计算分析了工质侧、烟气侧以及管壁导热对水冷壁总传热特性的影响,并着重分析三者之间的耦合关系。

1 数学模型

1.1 水冷壁内、外壁温计算

超超临界锅炉水冷壁管内工质温度与管子几何结构、内壁换热系数、管子导热系数和管外烟气热负荷分布有关。管子正面内壁温度计算式为:

$$t_n = t_f + J_n \frac{\beta}{\alpha_2} q_w \quad (1)$$

式中: t_f —壁温计算点处的工质温度; J_n —管子正面内壁热量均流系数; β —水冷壁管外径与内径的比值, $\beta = d_w/d_i$; d_w —外壁直径; d_i —内壁直径; q_w —壁温计算点处正面外壁辐射热负荷。

管子正面外壁温度计算式为:

$$t_w = t_f + J_n \frac{\beta}{\alpha_2} q_w + \bar{J} q_w \frac{\delta}{\lambda} \frac{2\beta}{\beta + 1} \quad (2)$$

式中: $\bar{J}$ —管子正面沿厚度方向上的平均热量均流系数; δ —管壁厚度; λ —金属导热系数。

1.2 水冷壁外壁热量计算

CFB 锅炉内辐射换热发生在近壁面区域,可以看作水冷壁半表面积换热(烟气侧受热),对流换热也发生在相同的区域,也可以看作水冷壁半表面积换热。因此,与煤粉炉相比,CFB 锅炉燃烧和传热之间可以视为全表面积换热。水冷壁吸热量计算式为:

$$Q = KA_t \Delta T \quad (3)$$

式中: Q —传热量; K —水冷壁全表面积传热系数; ΔT —炉内温度与水冷壁内工质的对数平均温差;

A_1 —水冷壁烟气侧全表面积。

$$\Delta T = \frac{(T_g^i - T_s^0) - (T_g^0 - T_s^i)}{\ln(T_g^i - T_s^0) - \ln(T_g^0 - T_s^i)} \quad (4)$$

式中: T_g^i —水冷壁底部烟气温; T_g^0 —水冷壁顶部烟气温; T_s^i —水冷壁进口工质温度; T_s^0 —水冷壁出口工质温度。

1.3 工质侧传热系数计算

工质侧传热系数采用西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室高温高压实验台的测试数据拟合得到^[12-13],与其它同类型经验关联式相比,具有更高的预测精度,表达式为:

$$\alpha_2 = 0.0212 \frac{\lambda}{d} Re_b^{0.83273} Pr_b^{0.11816} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.38128} \quad (5)$$

式中: α_2 —工质侧传热系数; λ —工质的导热系数; d —内螺纹水冷壁管当量内径; Re_b —以工质温度计算的雷诺数; Pr_b —以工质温度计算的普朗特数; ρ —不同截面的工质密度。

1.4 烟气侧传热系数计算

CFB 锅炉烟气侧主要传热介质为分散颗粒、烟气和颗粒团颗粒等,主要换热形式为对流换热和辐射换热,烟气侧综合传热系数表达式^[14-15]为:

$$h = \delta_c(h_c + h_{cr}) + (1 - \delta_c)(h_d + h_{dr}) + h_{gr} \quad (6)$$

式中: h —总换热系数; δ_c —固体颗粒覆盖水冷壁表面的时均份额; h_c —对流换热系数; h_{cr} —辐射换热系数; h_d —分散相对流换热系数; h_{dr} —分散相辐射换热系数; h_{gr} —气体辐射换热系数。

固体颗粒覆盖水冷壁表面的时均份额:

$$f = 1 - \exp\left[-6\left(\frac{U_0}{U_{mf}}\right)^{-1/4}\left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{3/4}F_{rd}(1 - \varepsilon_{avg})\right] \quad (7)$$

式中: U_0 —表观速度; U_{mf} —临界流化风速; ρ_p —固体颗粒密度; F_{rd} —傅劳德数; ε_{avg} —炉内截面平均孔隙率。

颗粒对流换热系数^[16]:

$$h_c = \left(\frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_e}\right)^{-1} \quad (8)$$

式中: h_w —颗粒与水冷壁表面的换热系数; h_e —颗粒时均对流换热系数。

颗粒时均对流换热系数:

$$h_e = \frac{1}{t_c} \int h_t dt = \sqrt{\frac{4k_e c_p \rho_e}{\pi t_c}} \quad (9)$$

式中: t_c —颗粒与壁面接触时间; k_e —颗粒导热系数; c_e —颗粒比热容。

颗粒辐射换热系数^[17]:

$$h_{cr} = \frac{\sigma(T_b^4 - T_w^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)(T_b - T_w)} \quad (10)$$

式中: σ —波尔兹曼常数; T_b —床层温度; T_w —水冷壁表面温度; ε_c —颗粒吸收率; ε_w —水冷壁壁面吸收率。

1.5 水冷壁总传热系数计算

水冷壁总传热系数包含三部分热阻:烟气侧热阻 $1/\alpha_1$ 、工质侧热阻 $1/\alpha_2 \cdot S_t/S_f$ 和水冷壁本身的热阻 δ/λ 。

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{S_t}{S_f} + \frac{\delta}{\lambda}\right)^{-1} \quad (11)$$

式中: α_1 —烟气侧传热系数; α_2 —工质侧传热系数; S_t —烟气侧总面积; S_f —工质侧总面积; δ —水冷壁厚度; λ —金属导热系数。

鳍片对传热系数的影响:

$$\alpha_1 = \alpha_1' [1 - P(1 - \eta_{fin})] \quad (12)$$

式中: P —鳍片面积系数; η_{fin} —鳍片利用系数; α_1' —烟气侧传热系数。

2 算例分析

2.1 炉膛结构及参数

炉内燃烧与水冷壁之间、水冷壁与管内工质之间的热量传递关系是十分复杂的。本文以某电厂 600 MW 超超临界 CFB 锅炉为例,锅炉结构参数见表 1,测量出了不同负荷下炉膛和烟道内不同位置的烟气(物料)温度分布、炉膛压力变化等数据,统计结果见表 2。

表 1 锅炉结构参数

Tab. 1 Boiler structure parameters

名称	数值
炉膛截面/m	25.376 × 16.952
管子规格/mm	32 × 7
截距/mm	52
管子数量/根	1 630
质量流量(BMCR)/kg · m ⁻²	1 114
质量流量(临界负荷)/kg · m ⁻²	846
质量流量(30% BMCR)/kg · m ⁻²	342
水冷壁锥堆高度/m	8
水冷壁总高度/m	65

注:管子及鳍片材质为 15GrMoG

表 2 600 MW 超超临界循环流化床锅炉内不同区域温度与压力分布统计表

Tab.2 Statistical table of temperature and pressure distribution in different area in 600 MW ultra-super critical circulating fluidized bed boiler						
炉内位置	烟气(物料)温度/℃			炉膛(烟道)压力/kPa		
	100% BMCR	70% BMCR	50% BMCR	100% BMCR	70% BMCR	50% BMCR
风室	—	—	—	7.075	6.87	6.92
布风板	—	—	—	6.98	6.88	6.843
密相区	124.5	118.98	115.2	6.957	6.904	6.9
稀相区	887	876	871	2.804	2.76	2.69
炉膛上部	820.5	812.330	805.800	1.041	1.023	1.018
炉膛顶部	783	779	768.5	-0.240	-0.250	-0.238
分离器入口	721.5	715.9	714.4	-0.558	-0.567	-0.570
返料器出口	775.5	763.1	758.9	—	—	—
高温过热器	609	610.2	606.34	-0.675	-0.653	-0.671
低温过热器	456	449	446.5	-0.765	-0.771	-0.735
省煤器入口	364.5	363.8	360.63	-0.87	-0.792	-0.801
省煤器出口	192	189.7	185.98	-1.02	-1.045	-1.01
上级空气预热器	163	160	159.4	-1.27	-1.24	-1.19
中级空气预热器	145	143	142.2	-1.415	-1.432	-1.408
下级空气预热器	134.5	135.6	132.1	-1.76	-1.89	-1.701

2.2 水冷壁外表面热流密度分布

图 1 所示的是经测量计算,在 100% BMCR 负荷下、烟气平均温度 900 ℃ 时,后墙、中隔墙和侧墙水冷壁热流密度沿着炉膛高度方向的分布情况。可以看出:沿着炉膛高度方向热流密度逐渐下降,在炉膛下部区域热流密度比较高(炉膛底部区域水冷壁表面包覆有“卫燃带”,因而该区域水冷壁外表面热流密度以及传热性能较差,不在本文研究之列);对比图 2 可知,此时工质处于过冷区域,温度较低,水冷壁内不容易出现膜态沸腾或者蒸干等传热恶化现象。

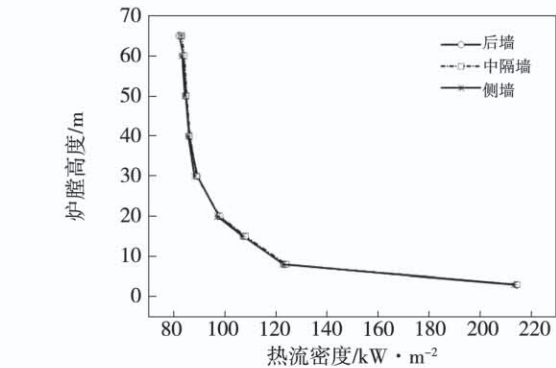


图 1 不同区域水冷壁外表面热流密度分布
Fig.1 Distribution of heat flux density on the outer surface of water-cooled wall in different regions

2.3 水冷壁内、外特征温度变化趋势

图 2 为不同区域水冷壁外壁温度、工质温度和内壁温度的计算结果。可以看出:水冷壁外表面温度与热流密度呈负响应关系,沿着炉高方向逐渐上升;工质温度与内壁温度也具有相似的特征,随着炉膛高度的上升而上升,但是不同区间的温升速率并不相同;在炉膛底部由于“卫燃带”的隔热作用,温升速率很小;中、下部区域水冷壁管内为单相过冷水,温升速率很高;在上部区域,管内工质进入临界状态,工质的吸热量主要用于相变过程,温升速率又开始变缓。

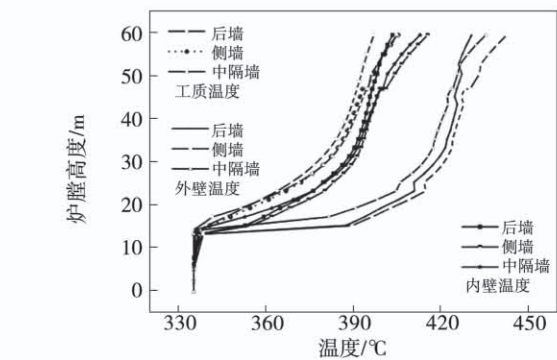


图 2 不同区域水冷壁特征温度变化趋势
Fig.2 Trends of characteristic temperature of water-cooled wall in different regions

3 模型计算与分析

3.1 工质侧传热特性分析

图 3 是按照式(5)计算的 100% BMCR 工况下,后墙、中隔墙和侧墙水冷壁工质侧传热系数随着炉膛高度的变化趋势。可以看出:工质侧传热系数随着炉膛高度的增加而增加,在 30 m 附近达到第一次峰值,后墙、中隔墙和侧墙水冷壁传热系数为 24.7, 25.9 和 27.3 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,随后开始下降;在 52 m 左右达到最大值,后墙、中隔墙和侧墙水冷壁传热系数为 33.8, 35.1 和 36.2 $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,超过 50 m 以上区域则迅速下降;出现最大值和波动现象的管段位于“大比热”区域内,此时水的物性急剧变化,比容迅速上升,汽化过程瞬时实现,粘度和导热系数急速下降,传热特性也随之剧烈变化,“大比热”物性见图 4。

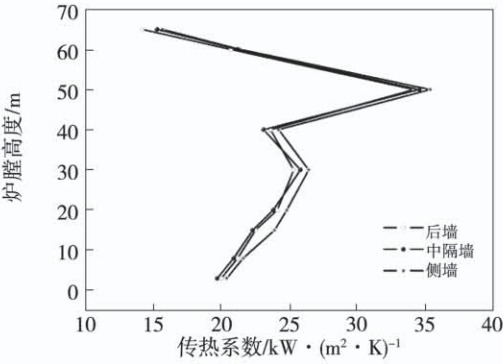


图 3 工质侧传热系数的变化趋势

Fig.3 Trend of heat transfer coefficient on the working fluid side

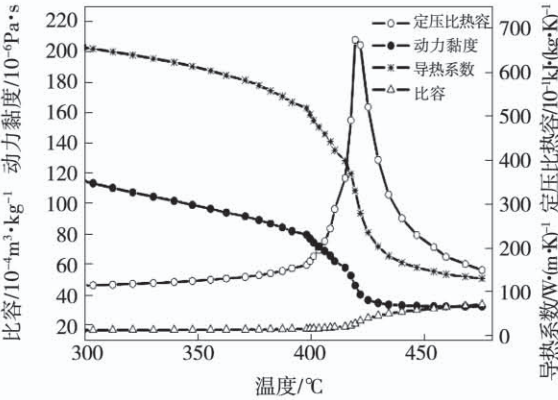


图 4 32 MPa 压力下水的物性变化特征

Fig.4 Variation characteristics of physical properties of water at 32 MPa pressure

3.2 烟气侧传热特性分析

从图 5 可以看出,烟气侧对流传热系数沿着炉膛方向减小。原因在于 CFB 锅炉内分为密相区、稀相区、上部以及顶部区域,燃料、灰渣等固体颗粒物浓度随着炉膛高度的上升而减小,颗粒之间的空隙率则相应增加,颗粒覆盖在水冷壁表面的时均份额也在递减,因而固相颗粒与水冷壁表面之间的对流传热系数随之下降。

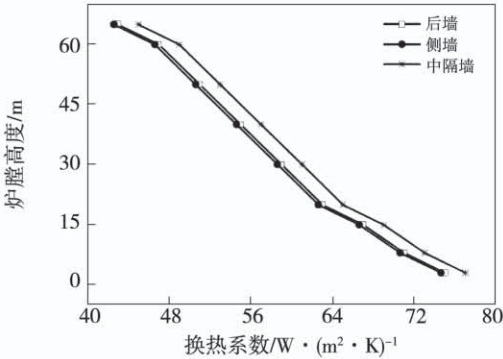


图 5 对流传热系数变化趋势

Fig.5 Trend of convective heat transfer coefficient

图 6 为辐射换热系数的变化趋势。由式(10)可以看出:炉膛温度对辐射换热强度起着决定性影响。表 1 的统计结果显示:沿着高度方向,炉内温度呈现下降趋势,辐射换热系数随之下降;另一方面,颗粒浓度降低会提高辐射换热强度,导致辐射换热系数增加,但是两者相比,床温的影响更为显著,辐射换热系数总体也就呈现递减趋势。

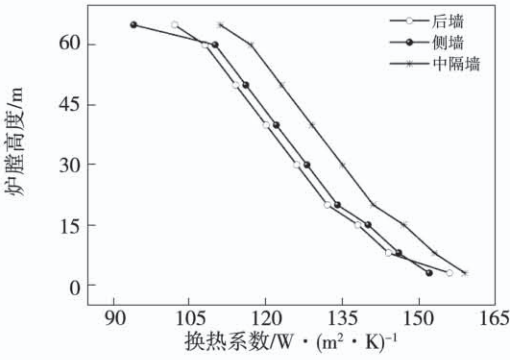


图 6 辐射换热系数变化趋势

Fig.6 Trend of radiation heat transfer coefficient

烟气侧传热系数是对流和辐射耦合作用的结果,两者皆是沿着炉高方向递减,传热系数也具有相同的变化趋势,如图 7 所示。

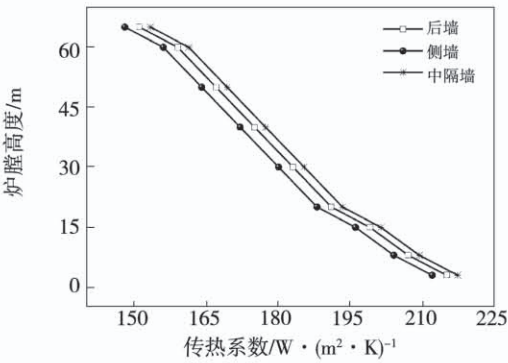


图 7 烟气侧传热系数变化趋势

Fig. 7 Trend of heat transfer coefficient on the flue gas side

3.3 水冷壁内、外传热耦合特性分析

图 8 为水冷壁总传热系数随着炉膛高度的变化趋势。可以看出:总传热系数沿着炉膛高度方向减小,在 30 m 以下区域速率很快,中隔墙、后墙和侧墙水冷壁总传热系数分别从 220, 215. 2 和 213 W/(m² · K)下降到了 178, 174 和 170 W/(m² · K),在 30 m ~ 50 m 区间仅下降了 4 ~ 5 W/(m² · K),在炉膛顶部区域总传热系数几乎不变。这是工质侧传热系数、烟气侧传热系数和水冷壁本身导热系数耦合作用的结果。在炉膛底部区域燃烧化学能储量巨大,颗粒物浓度也很高,对流和辐射换热强度都很大,换热系数自然比较高,这是 CFB 锅炉与煤粉炉传热特性的主要区别;炉膛上部和顶部区域的主要介质为烟气,颗粒浓度很低,该区域以辐射换热为主,总传热系数基本维持不变;工质侧传热系数除了在“大比热”区域较大外,其余部位变化不大,对总传热系数的影响不如对流和辐射。

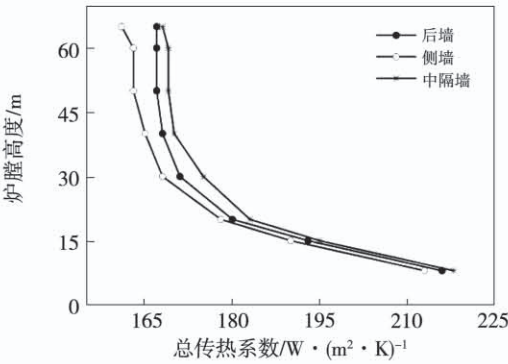


图 8 水冷壁总传热系数变化趋势

Fig. 8 Trends in total heat transfer coefficient of water-cooled wall

4 炉内燃烧对水冷壁传热的影响

影响锅炉传热系数的因素有工质温度、管壁温度、水冷壁表面黑度和受热面尺寸等,本节仅对能够体现 CFB 燃烧特征的炉膛温度和颗粒浓度两种参数展开具体分析。

4.1 颗粒浓度

CFB 锅炉内固相颗粒的粒径和浓度都远高于煤粉炉。从图 9 可以看出,颗粒浓度对水冷壁总传热系数的影响很显著,水冷壁总传热系数随着颗粒浓度的增加而上升,这是因为浓度越高,物料之间的间隙越小;炉膛温度和压力越高,物料颗粒之间以及物料与水冷壁表面之间的碰撞频率和幅度都会显著增大,这就大大增加了换热强度,水冷壁总传热系数也随之增加。

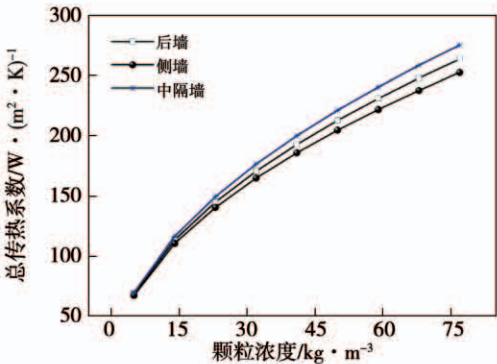


图 9 固体颗粒浓度对锅炉总传热系数的影响

Fig. 9 Effect of solid particle concentration on total heat transfer coefficient of boiler

4.2 炉膛温度

由图 10 可知,水冷壁总传热系数随着炉膛温度单调递增,是影响传热的关键参数。

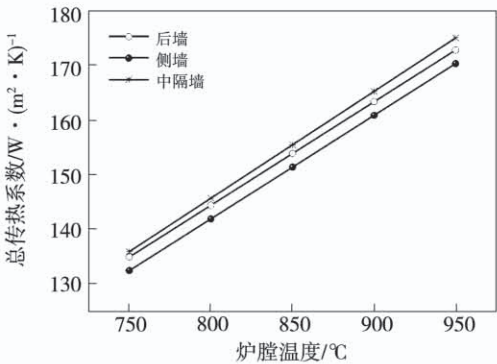


图 10 炉膛温度对锅炉总传热系数的影响

Fig. 10 Effect of furnace temperature on total heat transfer coefficient of boiler

另外,水冷壁表面传热系数也会随着炉膛温度的上升而提高。辐射换热机理前文已有论述,辐射和导热共同作用使水冷壁总传热系数增加。

5 结 论

(1) 与煤粉炉不同,在 CFB 锅炉中对流和辐射换热占据同等重要的地位。沿着炉膛高度方向,对流和辐射传热系数皆逐渐下降。因为,对床料颗粒之间以及床料与水冷壁表面之间对流换热起到关键性影响的是颗粒浓度和颗粒在水冷壁表面的时均份额;辐射传热的决定性因素是炉膛温度,它们都沿着炉膛高度的上升而下降。

(2) 在超临界压力下,水冷壁内工质的相变瞬时完成,但其升温过程经历与炉内燃烧完全不同的阶段。工质侧传热系数沿着炉膛高度方向先上升后下降,在“大比热”区域内出现剧烈波动并达到最大值。因为此时水的物性急剧变化,比容迅速扩大,粘度和传热系数急剧减小,对传热特性影响巨大。但从水冷壁总的传热特性来看,工质侧传热系数的影响不如炉膛内的对流和辐射。

(3) 水冷壁的传热特性是由工质侧传热系数、烟气侧传热系数和水冷壁管本身的导热系数耦合作用的结果。随着炉膛高度的增加,后墙、中隔墙和侧墙水冷壁总传热系数逐渐下降,不同高度管段导热系数的变化速率不同,30 m 以下区域总传热系数的下降速率很快,上部区域变化缓慢,炉膛顶部区域水冷壁总传热系数几乎不变。

(4) 水冷壁总传热系数随着炉内颗粒物浓度和炉膛温度的上升而单调上升,除了对流和辐射换热强度增加外,水冷壁管的导热系数也随着炉膛温度的上升而上升,其对水冷壁传热特性的影响也不可忽视。

参考文献:

- [1] SHEN Zhi, YANG Dong, WANG Si-yang, et al. Experimental and numerical analysis of heat transfer to water at supercritical pressures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 1676 – 1688.
- [2] 王一超, 贺 瑾, 朱天龙. 启停炉工况下循环流化床锅炉非稳态传热模拟与分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2018, 36(3): 47 – 50.
- [3] WANG Yi-chao, HE Jin, ZHU Tian-long. Simulation and analysis of unsteady heat transfer of circulating fluidized bed boiler in start-up and shutdown conditions[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2018, 36(3): 47 – 50.
- [4] 杨 冬, 于 辉, 华洪渊, 等. 超(超)临界垂直管圈锅炉水冷壁流量分配及壁温计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 32 – 38.
- [5] YANG Dong, YU Hui, HUA Hong-yuan, et al. Numerical computation on the mass flow rate profile and metal temperature in vertical water wall of an ultra supercritical boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 32 – 38.
- [6] 王思洋, 王文毓, 沈 植, 等. 高效宽负荷率超超临界锅炉垂直管圈水冷壁在低质量流速下的传热特性[J]. 动力工程学报, 2017, 37(2): 85 – 90.
- [7] WANG Si-yang, WANG Wen-yu, SHEN Zhi, et al. Heat-transfer performance of vertical water wall in an ultra-supercritical pressure boiler with high efficiency and wide regulation load at low mass flux[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 85 – 90.
- [8] 岳光溪, 吕俊复, 徐 鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 1 – 13.
- [9] YUE Guang-xi, LYU Jun-fu, XU Peng, et al. Development status and prospect analysis of circulating fluidized bed combustion[J]. China Electric Power, 2016, 49(1): 1 – 13.
- [10] 索疆舜, 崔志刚, 侯致福. 300 MW 循环流化床锅炉稀相区的传热研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(9): 69 – 73.
- [11] SUO Jiang-shun, CUI Zhi-gang, HOU Zhi-fu. Study on heat transfer in the dilute phase zone of a 300 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(9): 69 – 73.
- [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: 中国科学院大学, 2013.
- [13] WU Hai-bo. Research on the key technology of extended heating surface of large-scale circulating fluidized bed boiler[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [14] 周鸿波, 钟 崑, 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, 27(17): 94 – 99.
- [15] ZHOU Hong-bo, ZHONG Wai, TONG Shui-guang. Study on unified thermodynamic calculation model of circulating fluidized bed boiler based on experience[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 27(17): 94 – 99.
- [16] 许霖杰. 超/超临界循环流化床锅炉数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

- XU Lin-jie. Numerical simulation development of an ultra / supercritical circulating fluidized bed boiler [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] 许霖杰,程乐鸣,季杰强,等. 超/超临界循环流化床锅炉整体数值模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2): 348-355.
- XU Lin-jie, CHENG Le-ming, JI jie-qiang, et al. Integrated Numerical Model for Ultra/Supercritical CFB Boilers [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 348-355.
- [11] 熊 斌. 新型循环流化床锅炉结构布置及气固流动特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- XIONG Bin. Study on structure arrangement and gas-solid flow characteristics of a new circulating fluidized bed boiler [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [12] 李耀德. 超超临界循环流化床锅炉内中低品质燃料协同燃烧及重金属排放特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2019.
- LI Yao-de. Research on co-combustion of low-quality fuel and heavy metal emission characteristics in ultra supercritical circulating fluidized bed boiler [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2019.
- [13] 沈 植,姜 勇,王少飞,等. 超临界环形炉膛锅炉低质量流速内螺纹管传热特性[J]. 热力发电,2015,44(2): 53-57.
- SHEN Zhi, JIANG Yong, WANG Shao-fei, et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of low mass-flux rifled tube for supercritical pressure boiler with annular furnace [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(2): 53-57.
- [14] 骆仲决,李绚天,王勤辉,等. 循环流化床锅炉设计计算的探讨[J]. 动力工程,1994,14(4): 19-27.
- LUO Zhong-yang, LI Xuan-tian, WANG Qin-hui, et al. Discussion on design and calculation of circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 1994, 14(4): 19-27.
- [15] LECKNER B, SZENTANNAI P, WINTER F. Scale-up of fluidized-bed combustion-a review [J]. Fuel, 2011, 90: 2951-2964.
- [16] 吕俊复. 超临界循环流化床锅炉水冷壁热负荷及水动力研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- LYU Jun-fu. Investigation on heat flux and hydrodynamics of water wall of a supercritical pressure circulating fluidized bed boiler [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [17] 陈继辉. 大型CFB锅炉气固流动若干关键性技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- CHEN Ji-hui. Study on key technologies of gas-solid flow of large-scale CFB boiler [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

(孙嘉忆 编辑)