

防磨梁与防磨格栅对循环流化床锅炉 炉内传热的影响

陈翰^{1,2}, 黄中², 张曼², 曹云俊³, 张勇³,
杜鑫³, 王宏伟³, 马有福¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 清华大学 机械工程学院, 北京 100084;
3. 山西京能吕临发电有限公司, 吕梁 033299)

摘要: 循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉普遍存在炉膛水冷壁磨损严重的问题。为提高运行可靠性, 目前一般通过加装防磨梁或防磨格栅实现主动防磨, 但该方式会引起流场变化, 并对锅炉运行参数以及炉内传热造成影响。因此, 建立循环流化床锅炉全炉膛水冷壁传热计算模型, 提出加装防磨梁、防磨格栅后的边壁区颗粒浓度及传热面积修正系数计算方法, 利用该模型对某 440 t/h CFB 锅炉炉内传热特性进行计算。结果显示: 水冷壁加装防磨梁后, 传热系数和传热能力有所下降, 下降幅度和防磨梁数量有关, 采用 6 道和 12 道防磨梁时, 传热系数分别下降 0.32% 和 2.89%, 传热量分别下降 3.28% 和 8.68%; 比较而言, 防磨格栅对炉内传热系数和传热能力影响较小, 加装与防磨梁相同数量的防磨格栅时, 表现出了一定的传热强化效果, 传热量略有上升, 当防磨格栅加装数量增加至 30 道时, 传热系数下降 5.76%, 传热量上升 1.59%。防磨格栅在降低水冷壁磨损的同时, 对锅炉运行造成的影响较小, 优于防磨梁。该模型可对 CFB 锅炉防磨技术的选用以及设计方案优化提供理论参考。

关键词: 循环流化床锅炉; 防磨梁; 防磨格栅; 传热系数; 传热量

中图分类号: TK 22 **文献标志码:** A

Influence of anti-wear beam and grid on heat transfer in circulating fluidized bed boiler

CHEN Han^{1,2}, HUANG Zhong², ZHANG Man², CAO Yunjun³, ZHANG Yong³,
DU Xin³, WANG Hongwei³, MA Youfu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100300)

第一作者: 陈翰(1998-), 男, 硕士研究生。研究方向: 循环流化床锅炉炉内磨损及传热过程。E-mail: kaixinmao1998@163.com

通信作者: 黄中(1983-), 男, 研究员。研究方向: 循环流化床锅炉新技术。E-mail: huangzhong@tsinghua.edu.cn

引文格式: 陈翰, 黄中, 张曼, 等. 防磨梁与防磨格栅对循环流化床锅炉炉内传热的影响[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(4): 392-399. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230306003

Citation: CHEN Han, HUANG Zhong, ZHANG Man, et al. Influence of anti-wear beam and grid on heat transfer in circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(4): 392-399.

2. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Shanxi Jingneng Lülin Power Generation Co., Ltd., Lüliang 033299, China)

Abstract: Severe water wall wear are common in circulating fluidized bed (CFB) boilers. Active wear protections are generally achieved by installing anti-wear beams or anti-wear grids at present, but these methods will cause changes in the flow field and affect the boiler operating parameters and heat transfer in furnace. Therefore, the calculation model for whole furnace water wall heat transfer of CFB boiler was established, and the calculation method, which was suitable for CFB boilers with anti-wear devices, for particle concentration and heat transfer area correction coefficient in the side wall area was proposed. At last heat transfer characteristics in the furnace of a 440 t/h CFB boiler were calculated by using the model. The results show that the heat transfer coefficient and heat transfer capacity decrease after the water wall is installed with anti-wear beams, and the decrease is closely related to the number of anti-wear beams. Specifically, when 6 and 12 anti-wear beams were used, the heat transfer coefficient decreased by 0.32% and 2.89%, and the heat transfer decreased by 3.28% and 8.68%, respectively. Comparatively speaking, the installation of anti-wear grid has less effect on the heat transfer coefficient and heat transfer capacity than anti-wear beam. A certain heat transfer enhancement effect was exhibited and heat transfer quantity increased slightly when the same number of grids as beams were installed. When the number of anti-wear grids increased to 30, the heat transfer coefficient decreased by 5.76% and the heat transfer increased by 1.59%. Anti-wear grid has less impact on boiler operation while reducing wear of water wall, which is better than anti-wear beam. The model can provide a theoretical reference for the selection of CFB boiler anti-wear technology and the design optimization.

Keywords: circulating fluidized bed boiler; anti-wear beam; anti-wear grid; heat transfer coefficient; heat transfer quantity

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉具有燃料适应性强、负荷调节范围大、燃烧效率高、污染物排放低等优点,在洁净煤燃烧发电领域得到广泛应用,目前在役的各型循环流化床锅炉的总装机容量超过 82.3 GW^[1]。CFB 锅炉普遍存在炉内受热面磨损问题,对其运行安全性和可靠性造成了不利影响。CFB 锅炉磨损问题与炉内存在大量高速运动的颗粒及颗粒团紧密相关^[2-4],水冷壁近壁区域颗粒下降流的最大速度可达 $7\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,受热面极易受到颗粒的冲击、切削、涡流,产生磨损。电力行业标准《循环流化床锅炉防磨技术导则》(DL/T 1906—2018)^[5]指出,磨损量与颗粒浓度一次方、气流速度三次方成正比。为减轻磨损带来的危害,防磨梁、防磨格栅技术被开发应用于 CFB 锅炉^[6-7],其技术原理是通过降低边壁流速度及浓度,实现主动防磨。使用过程中,安装数量是需要重点考虑的问题,否则极易影响锅炉运行。山东某 CFB 锅炉在炉内加装 8 道

防磨梁后,炉膛排烟温度提升超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,锅炉带负荷能力降低^[8]。河北某 CFB 锅炉采用防磨梁技术后,额定负荷下床温上升 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,锅炉热效率有所下降^[9]。

肖平等^[10]认为防磨梁降低了边壁区颗粒悬浮物浓度,根据颗粒团更新传热理论模型的计算结果,炉膛水冷壁吸热降低 5% 左右。王世森^[11]将边壁区空隙率的变化考虑在内,建立带有防磨梁的炉膛稀相区传热数学模型,结果表明,加装防磨梁后,炉膛传热系数提升 2.379%。采用金属格栅替换防磨梁也是近年来主流技术路线。内蒙古某厂在炉内加装防磨梁后,锅炉负荷降低,发现原因是边壁层对水冷壁辐射面积减少,改装为金属格栅后,负荷回到正常水平^[12]。河北某 300 MW CFB 锅炉,拆除炉膛上部防磨梁并改装为金属格栅后,防磨效果良好且锅炉带负荷能力有所提升^[13]。陕西某 300 MW CFB 锅炉将后墙防磨梁拆除后,床温降低且炉膛上部磨损得到减轻^[14-15]。

由上可得,防磨梁与防磨格栅会影响烟气和颗粒对水冷壁的对流、辐射换热过程。然而,目前有关防磨装置传热研究的公开文献较少,部分学者针对加装防磨梁 CFB 锅炉传热系数的研究结论相悖,同时缺乏防磨格栅对炉内传热影响的定量分析。由于传热特性由气固流动特性决定,为进一步掌握防磨梁与防磨格栅对 CFB 锅炉炉内水冷壁传热的影响规律,本文通过考虑水冷壁面区域受防磨装置阻碍后的颗粒行为,以及单位有效受热面积的变化,建立了指导工程设计的传热计算模型,以一台 440 t/h CFB 锅炉为研究对象,提出了加装防磨梁、防磨格栅后的近壁区颗粒浓度及传热面积修正系数计算方法,研究了防磨梁与防磨格栅加装数量对传热的影响,可为工程设计优化与应用提供指导。

1 加装防磨装置后炉膛传热模型的建立

1.1 全炉膛水冷壁总传热模型

根据快速床的流动特点及实际测量结果,吕俊复等^[16-18]对于实际 CFB 锅炉炉膛传热的模型进行了深入研究,本文在此基础上提出式(1)和式(2),对经过防磨改造的 CFB 锅炉吸热量进行计算。

对于加装防磨格栅的 CFB 锅炉,炉膛受热面的吸热量按式(1)计算:

$$Q = K(\eta_g H) \Delta T \quad (1)$$

对于加装防磨梁的 CFB 锅炉,炉膛受热面的吸热量按式(2)计算:

$$Q = K(\eta_b H) \Delta T \quad (2)$$

式中: Q 为传热量; K 为基于烟气侧总面积的传热系数; H 为炉膛水冷壁受热面面积; ΔT 为温差; η_g 为加装防磨格栅后水冷壁受热面积修正系数; η_b 为加装防磨梁后水冷壁受热面积修正系数。

1.2 传热系数计算模型

传热热阻由烟气侧热阻、工质侧热阻、受热面本身热阻及附加热阻 4 部分组成,基于烟气侧总面积的传热系数 K 为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b''} + \frac{1}{\alpha_f} \frac{H_f}{H_t} + \varepsilon_a + \frac{\delta_1}{\lambda}} \quad (3)$$

式中: α_b'' 为烟气侧向壁面总表面的名义换热系

数; α_f 为工质侧换热系数^[19]; H_t 为烟气侧总面积; H_f 为工质侧总面积; ε_a 为附加热阻; δ_1 为管壁厚度; λ 为受热面金属导热系数。

1.2.1 烟气侧传热系数

烟气侧向壁面总表面的名义换热系数 α_b'' 与受热面结构有关,表达式如下:

$$\alpha_b'' = [P(\eta - 1) + 1] \frac{\alpha_b}{1 + \varepsilon_s \alpha_b} \quad (4)$$

式中: ε_s 为受热面壁面污染系数,一般取 0.0005; 鳍片面积系数 P 与鳍片利用系数 η 可分别按式(5)及式(6)进行求解,即

$$P = \frac{H_{fm}}{H_t} = \frac{s - d}{s - \delta_1 + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right)d} \quad (5)$$

式中: P 为鳍片面积系数; H_{fm} 为鳍片面积; H_t 为烟气侧总面积; s , d 分别为管子节距、外径。

$$\eta = \frac{\text{th}(\beta h'')}{\beta h''} \quad (6)$$

式中: β 与受热面受热情况、膜式壁鳍片结构尺寸和材料等有关; h'' 为有效高度。

床层与受热面之间的传热过程可分为: 辐射换热、颗粒相对流换热及气相对流换热,工程上将 3 个过程简化为线性叠加,可得到基于烟气侧总面积的烟气侧传热系数:

$$\alpha_b = \alpha_r + \alpha_c \quad (7)$$

式中, α_r 和 α_c 分别为辐射换热系数和对流换热系数,计算方法见式(8)和式(9)。

$$\alpha_r = \varepsilon \sigma (T_b + T_w)(T_b^2 + T_w^2) \quad (8)$$

式中: σ 为玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; ε 为系统黑度; T_w 为受热面金属外表面温度; T_b 为床层温度。

对流换热系数 α_c 由烟气对流和颗粒对流两部分组成,即

$$\alpha_c = \alpha_c^g + \alpha_c^p \quad (9)$$

式中, α_c^g 与 α_c^p 分别为烟气对流换热系数与颗粒对流换热系数,计算方法见式(10)和式(11)。

$$\alpha_c^g = C_c^g v_f^{0.7} \quad (10)$$

式中: C_c^g 为烟气对流系数, $4 \sim 6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$; v_f 为流化速度。

$$\alpha_c^p = C_c^p v_f^{0.7} \alpha_c^{p0} \quad (11)$$

式中: C_c^p 为颗粒对流系数,可按式(12)计算; α_c^{p0} 为初始流态条件下颗粒对流理论换热系数,与

颗粒的温度、粒度、受热面布置有关。

$$C_c^p = 1 - e^{(-C_{pc} C_p^{n_1})} \quad (12)$$

式中: C_{pc} 为颗粒系数, 一般为 $0.01 \sim 0.02$; n_1 为常数, 一般为 $0.85 \sim 1.25$; C_p 为水冷壁物料浓度。

水冷壁物料浓度 C_p 按式 (13) 计算:

$$C_p = -42 \frac{C_{pp}}{H_{lt} - h_1 - d_h} \left(\exp \left(-\frac{H_{lt}}{7} - 2.8 \right) - \exp \left(-\frac{d_h + h_1}{7} + 2.8 \right) \right) + 4.2 C_{pp} \quad (13)$$

式中: H_{lt} 为炉膛总高度; h_1 为炉膛下部锥体计算高度(从布风板算起); d_h 为梯形段上直段耐火层高度; C_{pp} 为物料浓度。

有关燃烧室传热系数及相关设计、运行参数的具体计算方法见文献 [16]。

1.2.2 颗粒浓度修正系数

在众多因素中, 局部颗粒浓度(或空隙率)对传热的影响最为显著^[20]。防磨格栅及防磨梁的加入, 在很大程度上改变了原炉内颗粒浓度沿床高的分布, 原模型不再适用于防磨改造后的 CFB 锅炉传热计算, 因此有必要对颗粒浓度进行修正。

a. 加装防磨格栅后全炉膛颗粒浓度修正系数。

防磨格栅指在炉膛水冷壁管鳍片上沿水平或垂直方向焊接合金耐磨板, 图 1 为安装后的金属格栅实物图^[21]。格栅减小了颗粒与颗粒团对管壁进行直接切削、撞击的几率, 消除了涡流与不规则流动引起的磨损。

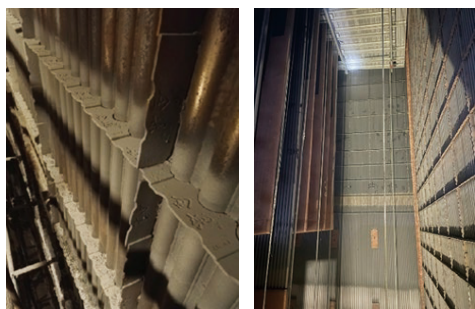


图 1 防磨格栅安装图^[21]

Fig.1 Installation diagrams of anti-wear grids^[21]

颗粒浓度与速度在轴向及径向上的不均匀分布是 CFB 锅炉的固有特点^[22], 而床向水冷壁的换热正是由边壁区气固两相向壁面的对流和辐射组成, 核心区气固两相的作用在于向边壁区完成动量交换和热交换^[23-24]。图 2 展示了加装防磨格栅后炉膛近壁区气固流场示意图, 格栅尺寸较小, 厚度仅为 5 mm 左右, 一般延伸出水冷壁管约 50 mm, 在炉内空间占比可忽略。一方面, 颗粒沿水冷壁

管加速下滑时, 受格栅阻碍, 部分被迫形成斜射流转向炉膛中心, 继而在炉内主气流的裹挟下向上运动; 另一方面, 格栅上方沉积形成的颗粒层在后续颗粒的加入下, 周期性发生局部滑落和大规模坍塌, 气固两相在炉内的整体混合得到加强, 截面平均空隙率减小。王杰等^[25]通过数值模拟得出, 安装 6 层与 9 层格栅的流化床反应器中, 截面固含率大大提高, 且 9 层格栅效果显著, 颗粒分布均匀指数可提升 17%。

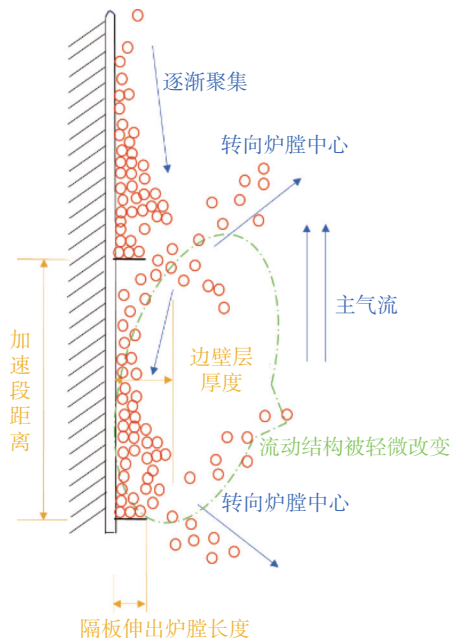


图 2 近壁区流动结构

Fig.2 Flow structure in near-wall region

由上述分析可得, 防磨格栅对水冷壁吸热过程的影响主要体现在: 格栅使得炉内整体气固混合更为均匀, 减小了截面平均空隙率, 促使核心区气固两相向边壁区完成热交换; 金属格栅导热性能良好, 本身也可视作等截面直肋, 扩充了水冷壁管受热面积。

鉴于磨损通常发生在炉膛中下部, 密相区及部分锥段区域一般加装有耐火耐磨材料层, 假定防磨格栅在光管水冷壁上由炉底至炉顶依次排列。本文参考 Wang 等^[26]对一内置隔板的循环流化床反应器数值模拟结果, 在 Wang 等之前的研究中, 由该模型模拟的 CFB 炉内典型物理过程得到试验验证, 基于 CFD-DEM 的数值模拟结果同样与试验数据吻合良好。此外, 考虑到 Wang 等在 CFB 反应器内采用多套格栅加装方案, 符合实炉通常依据磨损情况选取不同格栅数量, 因此, 本文通过最小二乘法拟合模拟结果得到以下修正系数, 用于修正加装格栅后全炉膛颗粒浓度。

格栅以等间距排列,并集中在反应器中下部时,最上层格栅上方修正关联式为

$$\xi_{g,1/c}(h) = -1.854h^2 + 1.3086h + 1.0208 \quad (14)$$

式中: h 为炉膛轴向高度, $0 \leq h \leq 0.6$; T 为函数周期, $T=0.6$ 。

格栅覆盖区域修正系数为

$$\xi_{g,1/c}(h) = 5.066h^2 - 1.9462h + 0.9471 \quad (15)$$

式中: $0 \leq h \leq 0.4$; $T = 0.4$ 。

格栅覆盖反应器过渡区、部分稀相区,甚至最上层格栅接近炉顶时,最上层格栅上方修正系数为

$$\xi_{g,2/c}(h) = -15.41h^3 + 8.8936h^2 - 0.4280h + 1.0112 \quad (16)$$

式中: $0 \leq h \leq 0.5$; $T = 0.5$ 。

格栅覆盖区域修正系数为

$$\xi_{g,2/c}(h) = 6.059h^2 - 2.5993h + 0.8518 \quad (17)$$

式中: $0 \leq h \leq 0.5$; $T = 0.5$ 。

工程计算中,颗粒浓度随炉膛轴向高度降低而升高,通常取一特征物料浓度,表征全炉膛颗粒分布总体情况。因此对沿炉膛高度变化的修正系数求平均值。

$$\bar{\xi}_{g,i/c}(h) = \frac{\int_x^{x+h_0} \xi_{g,i/c}(h) dh}{h_0} \quad (18)$$

式中: $i=1, 2$; h_0 为格栅覆盖区域高度或光管水冷壁高度。

在最底层防磨格栅下方,此处已接近密相区,受气固扰动剧烈的影响,格栅对该区域颗粒流动近似不产生影响。综上所述,有必要提出全炉膛颗粒浓度影响系数。

$$\xi_g = \frac{H_{g,c}}{H_t} \bar{\xi}_{g,i/c} + \frac{H_{g,e}}{H_t} \bar{\xi}_{g,i/e} \quad (19)$$

式中: ξ_g 为加装格栅后全炉膛颗粒浓度修正系数; $i=1, 2$ 。

最终加装防磨格栅后炉膛物料浓度由式(20)计算得到。

$$C_{pg} = C_p \xi_g \quad (20)$$

式中: C_{pg} 为加装格栅后炉膛水冷壁物料浓度; C_p 为原炉膛水冷壁物料浓度。

b. 加装防磨梁后全炉膛颗粒浓度修正系数。

防磨梁为耐火耐磨材料浇注而成的凸台,由销钉固定在水冷壁上。图3为防磨梁结构及加装

后炉膛气固流场示意图,由于多阶防磨凸台的存在,边壁流每加速下降一段距离,随即被缓冲减速,速度得以始终维持在较低范围^[10]。

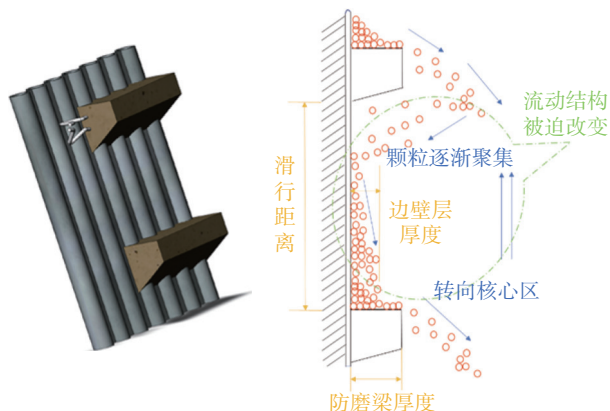


图3 防磨梁结构及炉膛气固流场示意图

Fig.3 Structure of anti-wear beam and flow field in a boiler

如图3所示,固体颗粒流受到防磨梁的阻挡后,颗粒团被分散,在梁下方一定距离,壁面上有多个下降流重新形成,并以较低浓度在两层防磨梁之间聚集、加速。边壁区流动结构会受梁结构影响,因此对于大部分加装防磨梁的锅炉,炉膛稀相区内,边壁区颗粒浓度与截面平均颗粒浓度皆下降;最顶层防磨梁与炉顶之间的区域内,大量由于受梁阻碍被迫转向的分散颗粒在核心区主气流的携带下聚集在此,该处截面平均颗粒浓度有所上升。此外,由于防磨梁较宽,其上方易形成更高的自然积灰层,与防磨梁共同占据一定受热面积,梁本体导热系数^[27]约为 $2 \sim 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,梁上颗粒层导热系数^[28]约为 $0.6 \sim 0.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,皆远远小于常用作水冷壁管的导热系数,形成较大的附加热阻。

由上述分析可得,防磨梁对水冷壁吸热过程的影响主要体现在:炉膛稀相区内的防磨梁,梁下方大部分区域颗粒浓度及速度陡降,梁上一小部分区域颗粒浓度小幅上升。最上层梁至炉顶之间区域,截面平均颗粒浓度上升。梁本体与梁上缓冲层的存在大大减小了炉膛有效受热面积。

Xu等^[29]对一安装8道防磨梁CFB锅炉近壁区颗粒体积分数的数值模拟结果与传热系数轴向分布的数值计算结果基本一致,其中部分点位传热系数与实测值接近,体积分随轴向高度的变化符合CFB锅炉水冷壁面区域气固流动一般规律。因此,本文基于上述模拟结果,选取该数值,通过最小二乘法拟合得到以下修正系数,以体现防

磨梁对边壁区颗粒浓度的影响。

最上层防磨梁上方修正系数为

$$\xi_{b,e}(h) = -1.167h^2 - 0.997h + 1.1605 \quad (21)$$

式中: $0 \leq h \leq 0.15$; $T = 0.15$ 。

防磨梁覆盖区域修正系数为

$$\xi_{b,c}(h) = 0.02181h^3 - 0.4115h^2 + 1.8123h + 890.83 \quad (22)$$

式中: $0 \leq h \leq 3$; $T = 3$ 。

在实际计算中, 考虑到颗粒浓度通常取一平均值, 将沿炉膛高度变化的修正系数作定积分, 同样求平均值

$$\bar{\xi}_{b,e(c)}(h) = \frac{\int_x^{x+h_0} \xi_{b,e(c)}(h)dh}{h_0} \quad (23)$$

式中, h_0 为梁覆盖区域高度或光管水冷壁高度。

在最底层防磨梁至过渡区之间, 由于一、二次风对颗粒的携带、穿透作用远大于防磨梁对边壁流的阻碍作用, 局部区域流场不受影响, 提出全炉膛颗粒浓度修正系数。

$$\xi_b = \frac{H_{b,c}}{H_t} \bar{\xi}_{b,c} + \frac{H_{b,e}}{H_t} \bar{\xi}_{b,e} \quad (24)$$

式中, ξ_b 为加装防磨梁后全炉膛颗粒浓度修正系数。

最终加装防磨梁后炉膛物料浓度由式 (25) 计算得到。

$$C_{pb} = C_p \xi_b \quad (25)$$

式中: C_{pb} 为加装防磨梁后全炉膛水冷壁物料浓度; C_p 为原炉膛水冷壁物料浓度。

1.3 传热面积计算模型

1.3.1 加装防磨格栅后全炉膛受热面积模型

防磨格栅具有以下特点: 本体较薄, 所占受热面积忽略不计; 导热性能良好, 发挥等截面直肋的作用; 格栅上方形成灰颗粒堆积层, 阻碍炉内传热。综上所述, 本文提出每平方米有效受热面积概念, 将上述影响因素考虑在内, 提出新的面积计算关联式

$$\eta_g = 1 + \frac{H_g - H_{gp}}{H_t} \quad (26)$$

式中: η_g 为加装防磨格栅的炉膛受热面积修正系数; H_g 为肋片扩充面积; H_{gp} 为格栅上方颗粒堆积层总面积。

1.3.2 加装防磨梁后全炉膛受热面积模型

防磨梁具有以下特点: 本体较大且导热系数低, 占据相当一部分受热面积; 与格栅类似, 梁

上方存在不利于传热的灰颗粒堆积层。本文在原炉膛完整受热面的基础上, 提出新的面积计算关联式

$$\eta_b = 1 - \frac{H_b + H_{bp}}{H_t} \quad (27)$$

式中: η_b 为加装防磨梁的炉膛受热面积修正系数; H_b 为防磨梁所占受热面面积; H_{bp} 为梁上方颗粒堆积层总面积。

2 结果及分析

采用上述传热模型, 在某 440 t/h CFB 锅炉 100% 负荷条件下, 对炉内水冷壁传热系数、传热量进行计算, 研究防磨格栅层数、防磨梁层数对炉内传热的影响。防磨格栅和防磨梁的结构特征如图 4 所示。

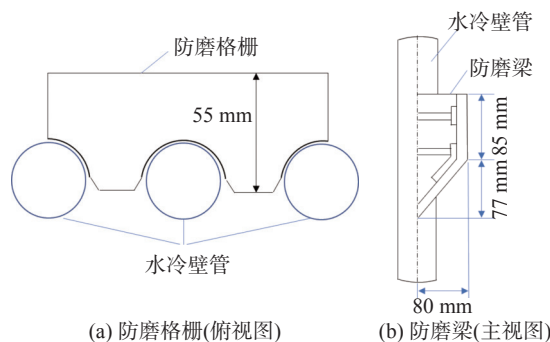


图 4 防磨格栅、防磨梁结构图

Fig.4 Structure of anti-wear grid and beam

图 5 为防磨格栅、防磨梁安装层数对全炉膛水冷壁传热系数及传热量的影响。红色虚线及黑色虚线分别表示原炉膛传热量与传热系数。图中可以看出, 随格栅层数增加, 炉膛四周水冷壁传热量先增后减, 但始终大于未加装之前, 表明格栅对炉内传热有整体提升效果。由模型分析可得, 尽管格栅上方缓冲层的存在减少了受热面积, 但格栅所扩充的受热面足以抵消这部分影响, 在模型中表现为 $H_g - H_{gp} > 0$, 因此加装防磨格栅的炉膛受热面积修正系数 η_g 始终大于 1, 受热面积的增加在一定程度上增加了对流传热量; 随格栅层数增加, 传热系数先增后减, 并逐步降至低于原炉膛传热系数水平。图中还可以看出, 随防磨梁层数的增加, 炉膛总传热系数及传热量随之减少, 均低于未加装之前水平。由模型分析可得, 防磨梁对炉内传热的影响因素源于梁本体、梁上堆积层导致受热面积减小以及两层梁之间颗粒浓度大幅降低, 在模型中表现为 η_b 始终小于 1。随层数的增加, 颗粒浓度修正系数 ξ_b 及局部颗

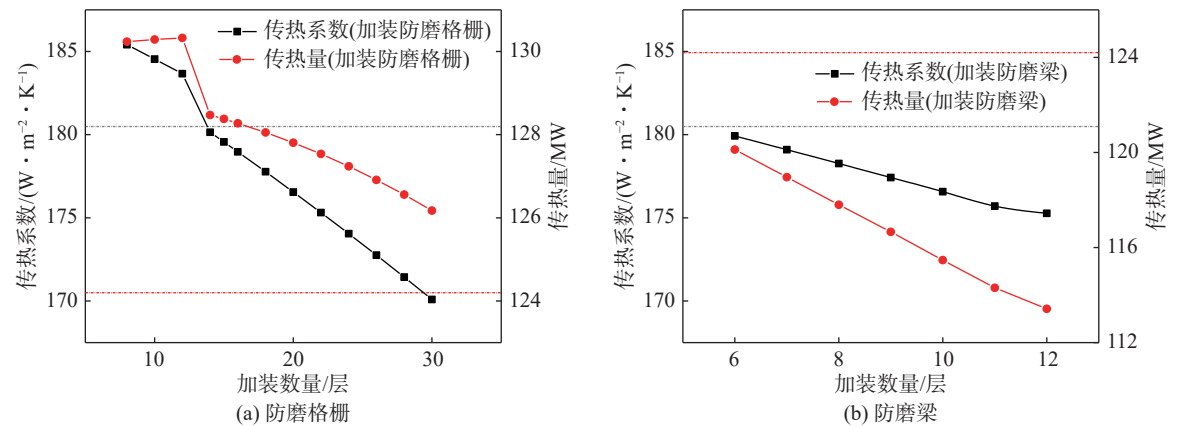


图5 防磨格栅与防磨梁加装数量对传热系数和传热量的影响

Fig.5 Influence of the number of anti-wear grids and anti-wear beams on heat transfer coefficient and quantity

粒浓度 C_{pb} 愈发降低。

图6为加装防磨格栅及防磨梁后炉膛传热系数、传热量变化率与安装层数的变化关系。结果表明：防磨格栅安装12道时，炉内传热量变化率达到最大，为4.93%；随层数进一步增加至30道时，炉内传热量逐步下降，仅提升1.59%。尽管格栅并不直接对炉内传热量产生负面影响，但会造成炉膛总传热系数持续下降。安装14道格栅时，传热系数已低至原先水平，随层数增加，传热系数最大可下降5.76%，传热系数下降导致锅炉效率下降，甚至对局部区域产生安全隐患。因此，在兼顾锅炉防磨与传热特性的影响下，应控制格栅数量，将其尽可能地集中于磨损严重区域。而防磨梁对传热系数及传热量的影响皆大于防磨格栅，防磨梁由6道增至12道后，传热系数分别下降0.32%与2.89%，传热量分别降低3.28%和8.68%。这是因为防磨梁本体较水冷壁管延伸长度较多，且耐磨耐火材料导热系数较低，随防磨梁安装层

数的增加，所占受热面积难以忽略，会对炉内传热造成较大影响。防磨格栅因为伸出水冷壁长度较短，在缓冲层息止角一定的情况下，缓冲层所占面积较小，抵消了部分缓冲层热阻带来的不利影响。这一点在实际应用中得到印证，很多工程项目已经开始使用防磨格栅替代防磨梁^[30]。

3 结 论

根据相关文献中数值模拟结果，并基于对CFB锅炉传热模型的研究，建立了适用于加装防磨梁、防磨格栅的CFB锅炉炉内传热模型。该模型能够对全炉膛水冷壁传热系数、传热量作出较好预测。

通过对某440 t/h CFB锅炉在100%负荷下全炉膛水冷壁传热系数、传热量进行计算，结果显示：防磨梁对循环流化床锅炉炉内传热起抑制效果，且传热系数、传热量随安装层数的增加快速降低，加装12道防磨梁时，炉内传热系数及传热量最大分别降低2.89%和8.68%。分析认为，边壁区颗粒浓度以及有效传热面积同时减小是防磨梁对炉内传热造成负面影响的主要因素。

防磨格栅由8道增加至12道时，传热系数略有降低，但传热量分别上升4.86%和4.93%，格栅层数进一步增加至30道，传热系数下降5.76%，传热量上升1.59%。这是颗粒浓度与传热面积相互竞争的结果，尽管高导热格栅片增加了水冷壁管有效受热面积，但炉内颗粒浓度随层数的增加而减少，因此格栅强化炉内传热的效果与其布置方案紧密相关。

防磨格栅对传热影响小于防磨梁，但仍应控

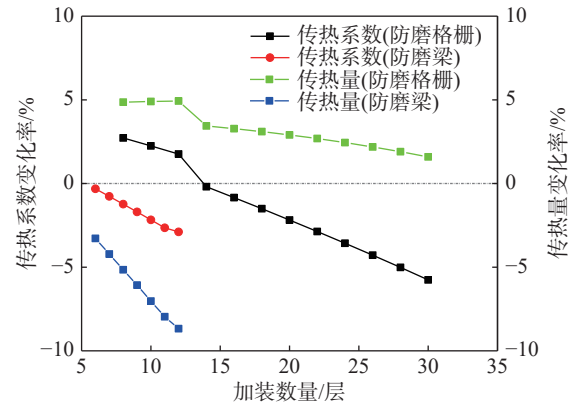


Fig.6 Comparison of calculation results between anti-wear beams and grids

制加装数量, 过多格栅的布置会破坏稳定的边壁流, 导致颗粒浓度下降过多。同时应合理控制格栅间距, 鉴于磨损通常发生在炉膛中下部, 且格栅有利于增加上层格栅至炉顶区域颗粒浓度, 因此可以采用下密上疏的布置方式, 在保证防磨效果的同时尽可能减轻对炉内传热的影响。

参考文献:

- [1] 黄中, 杨娟, 车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状 [J]. *热力发电*, 2019, 48(6): 1–8.
- [2] BASU P, FRASER S A. Circulating fluidized bed boilers: design and operations[M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991.
- [3] 方亮, 杜道山, 张晓峰, 等. 三体磨损中材料塑性变形磨损的数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(3): 268–272.
- [4] 夏云飞. 循环流化床锅炉水冷壁磨损机理与防止研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [5] 国家能源局. 循环流化床锅炉防磨技术导则: DL/T 1906—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [6] 黄中. 循环流化床锅炉优化改造技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [7] 石海峰. 防磨导流梁在大型循环流化床锅炉上的应用 [J]. *价值工程*, 2011, 30(17): 47–48.
- [8] 谭伟, 孙广军, 王晓东, 等. 循环流化床锅炉防磨梁设计加装不合理及处理措施 [J]. *小氮肥*, 2011, 39(7): 23–24.
- [9] 崔永平, 张志杰, 苗冬立. 220 t/h 循环流化床锅炉加装防磨梁改造 [C]//中国电机工程学会清洁高效发电技术协作网 2014 年会论文集. 银川, 2014: 1–9.
- [10] 肖平, 蒋敏华, 徐正泉, 等. CFB 锅炉多阶防磨装置及其对炉内传热的影响研究 [J]. *热力发电*, 2009, 38(5): 51–55, 76.
- [11] 王世森. 300 MW CFB 锅炉水冷壁防磨及传热特性研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2011.
- [12] 侯万林. 循环流化床锅炉防磨技术的探讨 [J]. *能源科技*, 2021, 19(3): 64–67.
- [13] 郭建利. 300 MW CFB 锅炉脱硝提效工艺研究与实施 [C]//2016 年清洁高效发电技术协作网年会论文集. 南京, 2016: 1–3.
- [14] 郭旭超. 浅谈 300 MW 循环流化床锅炉布风板阻力的重要性 [J]. *科技风*, 2019(21): 153.
- [15] 张代, 史丽超. 300 MW 级循环流化床锅炉燃烧优化关键技术的实践研究 [J]. *中国煤炭*, 2019, 45(12): 76–81.
- [16] 吕俊复, 张建胜, 岳光溪, 等. 循环流化床锅炉燃烧室受热面传热系数计算方法 [J]. *清华大学学报*, 2000, 40(2): 94–97, 101.
- [17] ZHANG J S, LV J F, YANG H R, et al. Investigation on heat transfer in CFB boiler[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Coal Combustion. Beijing, 1999: 436–442.
- [18] LV J, ZHANG J, XING X, et al. Solid suspension density distribution in the furnace of 75 t/h circulating fluidized bed boiler with water-cooled square separator[C]//Proceedings of the 4th International Symposium of Multiphase Flow and Heat Transfer. Xi'an, 1999: 276–284.
- [19] 洛克辛. 锅炉机组热力计算标准方法 [M]. 北京锅炉厂设计科, 译. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- [20] 周星龙. 600 MW 循环流化床锅炉炉膛气固流动和受热面传热研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [21] 李建军. 350 MW 超临界循环流化床锅炉水冷壁磨损分析及策略 [J]. *冶金与材料*, 2020, 40(2): 31–33.
- [22] CAPES C E, NAKAMURA K. Vertical pneumatic conveying: a theoretical study of uniform and annular particle flow models[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1973, 51(1): 39–46.
- [23] 杨召. 新型超临界多旋风分离器循环流化床锅炉气固流动及传热均匀性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [24] 冯冰潇. 循环流化床锅炉布风板风帽特性及炉膛传热研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [25] 王杰, 李启昌, 周庆伟, 等. 格栅对新型流化床流动特性影响的模拟研究 [J]. *化学工程*, 2022, 50(10): 41–46.
- [26] WANG S, LUO K, HU C S, et al. CFD-DEM study of the effect of ring baffles on system performance of a full-loop circulating fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 196: 130–144.
- [27] 王东峰. 465 t/h 循环流化床锅炉炉内防磨梁改造 [J]. *能源工程*, 2014(4): 76–80.
- [28] 赵晓辉. 基于矿物质赋存形态与转变过程的炉内灰渣沉积研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [29] XU L J, CHENG L M, JI J Q, et al. Effect of anti-wear beams on waterwall heat transfer in a CFB boiler[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 1092–1098.
- [30] 陈翰, 姚禹歌, 张国庆, 等. 循环流化床锅炉炉内受热面磨损防护技术与应用进展 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(12): 18–29.

(编辑: 黄 娟)