

300 MW 循环流化床锅炉稀相区的传热研究

索疆舜¹, 崔志刚¹, 侯致福²

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西平朔煤矸石发电有限责任公司, 山西 朔州 036800)

摘要: 本文针对燃烧煤矸石的循环流化床锅炉的传热情况展开研究, 以山西平朔电厂 1 台 300 MW 的循环流化床锅炉为实例, 采用环核模型和颗粒团更新模型, 对稀相区的传热系数分布进行建模计算, 本文所建模型考虑炉内床温实际分布特征, 根据现场温度实测数据对模型进行修正, 研究了对流和辐射换热系数在不同负荷下沿炉膛高度的变化情况。锅炉在较高负荷下运行时, 负荷的波动对颗粒团壁面覆盖时均份额影响较小, 继而对炉内对流换热影响较小。炉内环形区温度沿床高的偏差随负荷升高略有减小, 且对辐射换热影响比对流换热大。随着负荷升高, 对流换热系数沿炉高下降增大, 而辐射换热系数沿炉高下降减小, 高负荷时炉内总换热系数沿炉高下降 25% 左右, 低负荷时沿炉高下降 28% 左右, 高负荷下炉内沿高度温差更小, 传热更稳定。

关键词: 裤衩腿型循环流化床锅炉; 煤矸石; 稀相区; 传热系数

中图分类号: TK229.6⁺6 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.09.012

引言

随着能源和环境问题的日益突出, 发展洁净煤技术显得尤为紧迫。循环流化床锅炉作为一种通用的洁净煤燃烧技术, 因其燃料适应性广、燃烧效率高、负荷调节范围宽、炉内传热能力强等优点日益受到重视。煤矸石是在采煤和洗煤过程中产生的一种废弃物, 具有高灰分、高硫分和低热值的特点, 长期堆积势必造成环境的污染和土地浪费。基于煤矸石和循环流化床锅炉技术的特点, 循环流化床锅炉燃烧煤矸石发电是最经济和环保的选择。循环流化床锅炉传热问题对电厂运行具有重要意义, 并且受诸多因素影响。不少学者对循环流化床锅炉传热都有研究。吕俊复、程乐鸣从机理方面较深入研究了流化床炉膛内部传热现象^[1~2], 考虑了烟气对流换热、

颗粒对流换热、辐射换热的影响, 并做了相关试验、比较和分析。已有文献大多对传热系数的计算模型中床温取为恒定值, 而不能准确反映其沿床高的分布特征。黄中、孙献斌等人通过对 CFB 锅炉温度场的测试研究得出: 炉膛壁面附近的温度低于炉膛中心温度^[3], 距壁面越近温度越低, 壁面附近温度低于炉膛中心温度 100 °C 左右, 并且锅炉负荷下降, 煤种在燃烧过程中表现出了一定的燃烧延迟, 导致稀相区有一定温升。可知炉内温度分布不均匀, 且会随负荷变化而有所改变。

本研究基于环核模型, 考虑燃料颗粒的宽筛分特性, 对 300 MW 循环流化床锅炉建立小室模型来研究炉内传热过程, 并结合现场温度测点得到的炉内和水冷壁温度分布情况, 选取各小室对应床温, 通过模型计算对掺烧煤矸石的循环流化床锅炉稀相区的传热系数分布及其影响因素进行研究。

1 建立流动模型

本文所研究的循环流化床锅炉为裤衩腿型, 以二次风入口高度为界分成密相区和稀相区, 建立如图 1 所示的模型, 再将稀相区沿炉高划分为 7 个小室。沿径向分为环形区和核心区, 这样划分出一系列的环形小室和核心小室^[4]。

假设每个划分的小区域颗粒分布均匀, 在核心区由于扬析和夹带作用, 颗粒及聚成的颗粒团向上流动, 环形区颗粒与颗粒团交替与壁面接触并向下沉积。建立宽筛分模型, 对所燃烧的煤样按颗粒粒径分档, 每一档对应一个循环流化床锅炉模型, 实际的循环流化床锅炉由每档对应的模型构成^[5]。

收稿日期: 2015-07-21; 修订日期: 2015-11-11

基金项目: 山西省青年科技研究基金资助项目(2015021124)

作者简介: 索疆舜(1991-), 男, 山西原平人, 太原理工大学硕士研究生。

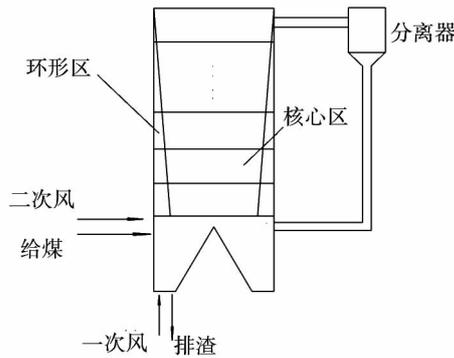


图 1 循环流化床锅炉的模型结构

Fig.1 Configuration of the model for circulating fluidized bed boilers

2 建立稀相区的传热模型

循环流化床锅炉稀相区的传热介质包括：颗粒分散相、烟气体和颗粒团颗粒。锅炉内换热形式主要是对流换热和辐射换热。锅炉床层与壁面间的传热主要是通过环形区内的颗粒流动特性实现的，所以环形区内的传热占整个传热的主要部分，具体换热主要依靠环形区内颗粒和气相与水冷壁交替接触换热，核心区颗粒的对流和辐射传热。由此可用以下公式计算：

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

式中： h —炉内传热总系数； δ_c —颗粒团覆盖壁面时均份额； h_c 、 h_{cr} 、 h_d 、 h_{dr} 、 h_{gr} —颗粒团对流、辐射传热系数、颗粒分散相对流、辐射传热系数，气体辐射传热系数。

2.1 颗粒团覆盖壁面的时均份额

由颗粒团更新模型可知颗粒团和气体轮流与壁面接触换热，用时间均值代表颗粒团所占壁面份额。根据 Lints & Glicksman 的研究表明：颗粒团覆盖壁面的时均份额随着床内颗粒浓度和床径的增大而增大，更多的壁面将被颗粒团所覆盖，本研究采用修正后的公式计算颗粒团覆盖壁面的时均份额。公式如下^[6]：

$$f = 1 - \exp \left[-6 \left(\frac{U_0}{U_{mf}} \right)^{-1/4} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{3/4} F_{rd} (1 - \varepsilon_{avg}) \right] \quad (2)$$

式中： U_0 —表观速度，m/s； U_{mf} —临界流化风速，m/s； ρ_p —颗粒密度，kg/m³； ρ_g —气体密度，kg/m³； F_{rd} —弗劳德数； ε_{avg} —炉膛截面平均空隙率。

2.2 颗粒团对流传热系数

文献[7]通过试验台上观察发现颗粒团并不是紧贴壁面下滑的，而是与壁面有一定的间隙，而间隙中形成一层气膜，这样也给颗粒团对壁面的对流传热介入了一个热阻。由此颗粒团对流传热系数 h_c 通过下式计算：

$$h_c = \frac{1}{1/h_w + 1/h_e} \quad (3)$$

式中： h_w —颗粒团与壁面之间的传热系数，W/(m²·K)， $h_w = nK_g/d_p$ ， $n=2.5$ ； h_e —颗粒团的时均对流传热系数，W/(m²·K)。

$$h_e = \frac{1}{t_c} \int h_i dt = \sqrt{\frac{4K_c C_p \rho_c}{\pi t_c}} \quad (4)$$

式中： t_c —颗粒团与壁面接触时间，s； K_c —颗粒团的导热系数，W/(m·K)； C_p —颗粒团的比热容，J/(kg·K)。

2.3 颗粒团辐射传热系数

计算颗粒团辐射换热系数需要首先假设床和壁面是无穷大的平行平面，根据辐射换热公式可得：

$$h_{cr} = \frac{\sigma (T_b^4 - T_w^4)}{(1/\varepsilon_c + 1/\varepsilon_w - 1) (T_b - T_w)} \quad (5)$$

式中： σ —波尔兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)； T_b 、 T_w —床层和壁面温度，K； ε_w —壁面吸收率； ε_c —颗粒团吸收率，Grace 根据颗粒团多重反射原理提出了颗粒团的吸收率计算公式：

$$\varepsilon_c = 0.5(1 + \varepsilon_p) \quad (6)$$

2.4 颗粒分散相对流传热系数

颗粒分散相是气流中分散的颗粒，这部分颗粒在与锅炉壁面接触时发生强制对流传热现象，本研究用 Wen 和 Miller 提出的带尘气流传热系数关联式来计算固体颗粒分散相对流传热系数：

$$h_d = \frac{K_g C_p}{d_p C_g} \left(\frac{\rho_{dis}}{\rho_p} \right)^{0.3} \left(\frac{U_t}{gd_p} \right)^{0.21} P_r \quad (7)$$

式中： ρ_{dis} —颗粒分散相密度，kg/m³； U_t —颗粒终端速度，m/s； K_g —气体导热系数，W/(m·K)； C_p 、 C_g —固体颗粒、气体比热，J/(kg·K)； d_p —颗粒直径，m。

2.5 颗粒分散相辐射传热系数

辐射传热是炉内重要的传热分量,与颗粒团辐射传热类似,颗粒分散相辐射传热的计算也是基于床和壁面为平行无穷大的平面,计算式如下:

$$h_{cr} = \frac{\sigma(T_b^4 - T_w^4)}{(1/\varepsilon_b + 1/\varepsilon_w - 1)(T_b - T_w)} \quad (8)$$

式中: ε_b 一床的辐射率,按下式计算:

$$\varepsilon_b = \left[\frac{\varepsilon_p}{(1 - \varepsilon_p)B} \left(\frac{\varepsilon_p}{(1 - \varepsilon_p)B} + 2 \right) \right]^{0.5} - \frac{\varepsilon_p}{(1 - \varepsilon_p)B} \quad (9)$$

式中: ε_p 一颗粒表面吸收率; B 一漫反射影响因子,对于各向同性漫反射 $B = 0.5$,对于反射率颗粒 $B = 0.667$ 。

3 模型计算与分析

基于上述建立的模型,对 1 台 300 MW 的循环流化床锅炉进行不同工况下的计算,研究主体为亚临界中间一次再热裤衩腿型带有外置床式循环流化床锅炉,炉膛两侧依次布置 4 台高温绝热式旋风分离器、4 台 U 形返料器和 4 台外置式换热器。锅炉的额定汽压力为 17.4 MPa,额定蒸汽温度为 540 °C,设计效率为 91%,基本参数如下:炉膛宽度为 15 051 mm,深度为 14 703 mm,高度为 36 516 mm,设定的壁面灰度 0.85,颗粒密度为 2 200 kg/m³。为了更好模拟炉内传热真实情况,本研究采用宽筛分模型,文献[8]对山西平朔煤矸石电厂所燃烧的煤种进行取样,经过筛分,可将颗粒粒径分成 7 档,分布情况如表 1 所示。

表 1 煤样筛分粒径分布

Tab.1 Distribution of the particle diameter of coal samples sifted

筛分粒径/ μm	百分比/%
0 ~ 500	25.48
500 ~ 1 000	16.82
1 000 ~ 2 000	10.88
2 000 ~ 3 200	11.29
3 200 ~ 6 000	14.22
6 000 ~ 8 000	9.96
> 8 000	11.35

将每一档颗粒在 1 台型号为 GSL1600X 的真空管式炉内燃烧,模拟颗粒一次破碎,笔者对其所得实验数据进行处理后得到粒径分布如表 2 所示。

表 2 一次破碎后煤样粒径分布

Tab.2 Distribution of the particle diameter of coal samples after the primary fragmentation

筛分粒径/ μm	百分比/%
0 ~ 30	0.580 464
30 ~ 60	3.868 092
60 ~ 100	2.999 85
100 ~ 150	4.396 511
150 ~ 200	0.473 722
200 ~ 300	6.314 311
300 ~ 400	2.120 285
400 ~ 500	11.572 071
500 ~ 1 000	12.521 518
1 000 ~ 2 000	10.827 236
2 000 ~ 3 200	13.101 564
3 200 ~ 6 000	13.788 336
6 000 ~ 8 000	9.857 683
> 8 000	0.075 727 2

炉内传热主要靠环形区内的颗粒对流辐射作用,而由文献[9]知炉膛中心与壁面之间存在一个温度梯度,且随炉高增大,使得环形区平均温度下降。所研究的锅炉的稀相区入口和稀相区出口在同一高度的前墙和后墙均布置有温度测点,现假设环形区温度沿炉高呈线性下降趋势,在电厂 DCS(分散控制系统)图上记录不同负荷下测点的温度值,如表 3 所示。再确定各个小室平均温度,通过模型计算得到该炉传热系数分布情况:环形区颗粒团壁面覆盖份额随炉高和负荷的变化情况如图 2 所示。负荷上升,炉内颗粒浓度增大,形成颗粒团较多,所以壁面覆盖时均份额增大;由于随着炉高颗粒浓度下降,环形区颗粒团减少,壁面覆盖时均份额相对下降。在不同负荷下,同一高度的颗粒浓度变化直接影响份额的变化,这种影响随高度增加逐渐减小,并且可以看出负荷越高,壁面覆盖份额沿炉高的变化越明显。负荷率从 76.3% 上升至 92.6% 时,各高度壁面覆盖份额上升平均幅度明显比负荷率从 53.1% 升至 76.3% 时的幅度小得多,可见高负荷下负荷的波动对壁面覆盖份额影响较小。

表3 炉内温度测点记录

Tab.3 Record of the temperatures at various measuring points inside the furnace

	负荷率 53.1%	负荷率 76.3%	负荷率 92.6%
同高度稀相区入	762.67	829.39	856.36
口测点温度/℃	872.2	900.3	942.8
	843.8	854.3	895.6
同高度稀相区出	604.3	712.5	745.3
口测点温度/℃	679.6	714.2	755.3
水冷壁壁面	343.6	358.92	373.63
平均温度/℃			

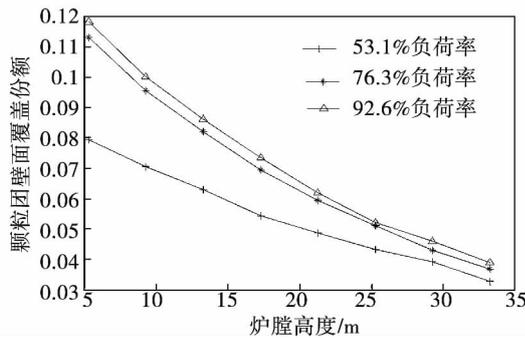


图2 颗粒团壁面覆盖份额随炉膛高度变化图

Fig. 2 Changes of the share of the wall surface covered by the particulate mass with the height of the furnace

由图3可知,沿CFB炉高对流传热系数呈下降趋势,原因是炉内空隙率沿炉高逐渐增加,同时环形区颗粒向下沉积作用,导致上部环形区的颗粒浓度逐渐减小,颗粒覆盖壁面时均值减小,对流传热系数相应减小,这与文献[10]的研究结果一致,还能看出随着负荷升高,炉膛各点处的传热系数随之升高,这也是颗粒浓度增大,床温上升的影响。在负荷率53.1%时,对流传热系数沿炉高下降22.53%,在负荷率76.3%时,对流传热系数沿炉高下降26.48%,在负荷率92.6%时,对流传热系数沿炉高下降27.19%。这与图2所示高负荷颗粒团壁面覆盖份额沿炉高下降趋势明显一致。同一高度下负荷上升74.4%,对流传热系数平均增加8%~15%。

床温是辐射传热的重要影响因素之一,随着炉高环形区内颗粒体积浓度和温度均下降,而颗粒的减少只会增强辐射传热,温度的降低会增强辐射传热,如图4所示,环形区内温度明显对辐射传热系数

影响较大,抵消了颗粒体积份额带来的影响。在负荷率53.1%时,辐射传热系数沿炉高下降31.18%,在负荷率76.3%时,辐射传热系数沿炉高下降25.51%,在负荷率92.6%时,辐射传热系数沿炉高下降24.46%。同一高度下负荷上升74.4%,辐射传热系数平均增加16%~24%。

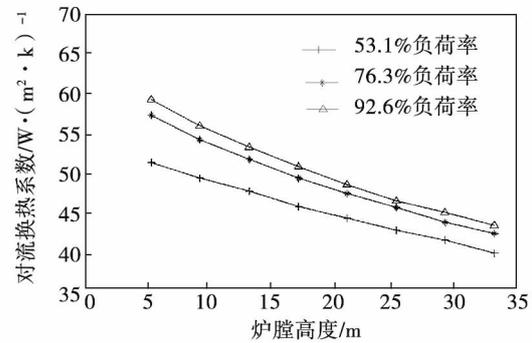


图3 不同负荷率下对流传热系数在炉内变化图

Fig. 3 Changes of the convective heat exchange coefficient in the furnace at various load rates.

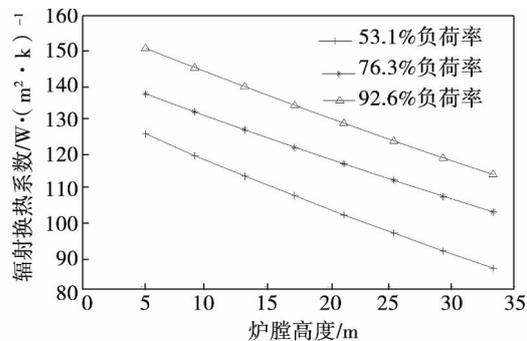


图4 不同负荷率下辐射传热系数在炉内变化图

Fig. 4 Chart showing changes of the radiant heat exchange coefficient inside the furnace at various load rates

稀相区总传热系数如图5所示,随炉膛高度增加呈下降趋势,在负荷率53.1%时,总传热系数沿炉高下降28.69%,在负荷率76.3%时,总传热系数沿炉高下降25.51%,在负荷率92.6%时,总传热系数沿炉高下降25.22%。同一高度下负荷上升74.4%,总传热系数增加12%~25%。

从以上总传热系数的变化分析可知循环流化床锅炉内传热系数沿炉高逐渐下降,主要是床温的不均匀造成的,尤其是在低负荷下,稀相区上部和下部

温度差更明显,这与文献[11]所得结论:随着负荷的增加,炉内各温度测点处温度都升高,炉膛上下温差逐渐减小保持一致。所以在高负荷下,炉内温度较均匀,传热更稳定。

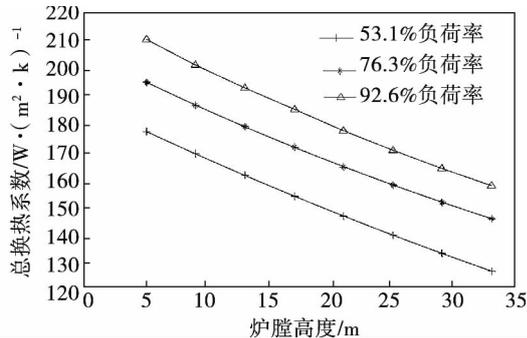


图5 不同负荷率下总换热系数在炉内变化图

Fig. 5 Changes of the total heat exchange coefficient inside the furnace at various load rates

根据汽水系统运行的实测数据计算得到各负荷下产生蒸汽的总吸热量,与模型计算得到锅炉稀相区总放热量进行对比验证,由图6可得,二者数值差随负荷变化有变动,负荷率53.1%时,差值约为 0.37×10^5 kW,稀相区放热量占总吸热量约为75.7%;负荷率76.3%时,差值约为 0.24×10^5 kW,稀相区放热量占总吸热量约为83.1%;负荷率92.6%时,差值约为 0.48×10^5 kW,稀相区放热量占总吸热量约为73.8%。综上可知稀相区放热占锅炉总放热主要部分,不考虑其它因素影响,大约占70%~80%左右,该模型计算值与实测值趋势基本一致。

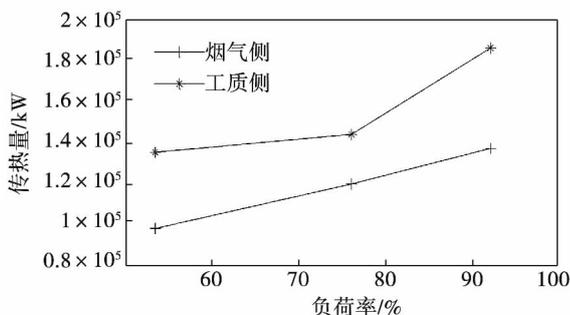


图6 烟气侧计算值与工质侧实测值的对比

Fig. 6 Contrast of the calculation values at the flue gas side with those actually measured at the working medium side

4 结论

本研究对1台实际运行的300 MW的燃烧煤矸石的循环流化床锅炉建模结合实际炉内温度测点进行计算并分析,对实际炉内的换热情况作了模拟,得到炉内各高度的传热系数分布,得出炉内颗粒传热与沿炉高变化的颗粒浓度和环形区的温度变化密切相关。比较了在高负荷和低负荷下传热系数的变化情况,得出结论:

(1) 锅炉在较高负荷下运行时,负荷的波动对颗粒团壁面覆盖时均份额影响较小,继而对炉内对流换热影响较小;

(2) 炉内环形区温度沿床高的偏差随负荷升高略有减小,且对辐射换热影响比对流换热大;

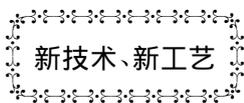
(3) 随着负荷升高,对流换热系数沿炉高下降增大,而辐射换热系数沿炉高下降减小,高负荷时炉内总换热系数沿炉高下降25%左右,低负荷时沿炉高下降28%左右,高负荷下炉内沿高度温差更小,传热更稳定。

参考文献:

- [1] 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,1999,40(2):21-24.
LU Jun-fu, ZHANG Jian-sheng, YUE Guang-xi, et al. Method for calculating the heat transfer coefficient of the heating surface in the combustion chamber of a circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 40(2): 21-24.
- [2] 程乐鸣,骆仲决,倪明江,等.循环流化床中传热综述(试验部分)[J].动力工程,1998,18(2):20-34.
CHENGLÉ-ming, LUO Zhong-yang, NI Ming-jiang, et al. A survey of the heat transfer in the circulating fluidized beds (part of the test) [J]. Power Engineering, 1998, 18(2): 20-34.
- [3] 黄中,孙献斌,江建忠,等.CFB锅炉温度场及氧量场测试与数值模拟[J].中国电力,2013,46(9):7-11.
HUANG Zhong, SUN Xian-bin, JIANG Jian-zhong, et al. Testing and numerical simulation of the temperature field and oxygen content field in a CFB boiler [J]. China Electric Power, 2013, 46(9): 7-11.
- [4] YANG Chen, GOU Xiaolong. Dynamic modeling and simulation of a 410 t/h Pyroflow CFB boiler [J]. Computers and Chemical Engineering, 2006, 31: 21-31.
- [5] 李智,胡俊宇,王翔凤,等.135 MW循环流化床锅炉流动模

- 型[J]. 锅炉技术, 2009, 40(5): 46-49.
LI Zhi, HU Jun-yu, WANG Xiang-feng, et al. Model for the flow in a 135MW circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2009, 40(5): 46-49.
- [6] 苏亚欣, 骆仲决, 岑可法. 循环流化床颗粒团更新传热模型的修正[J]. 动力工程, 2001, 21(5): 1426-1427.
SU Ya-xin, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa. Correction of the heat transfer model for particle masses in circulating fluidized beds[J]. Power Engineering, 2001, 21(5): 1426-1427.
- [7] Wu R L, Grace J R. A model for heat transfer in circulating fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 1990, 45(12): 3389-3398.
- [8] 常卫明. 循环流化床锅炉物料平衡优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
CHANG Wei-ming. Optimization of the material balance in a circulating fluidized bed boiler[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.
- [9] 华玉龙. 循环流化床锅炉流动、传热和燃烧模型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
HUA Yu-long. Modeling for the flow, heat transfer and combustion in circulating fluidized bed boilers[D]. Wuhan: Central China University of Science and Technology, 2005.
- [10] 温山, 阎维平, 吴威, 等. 循环流化床锅炉炉内传热研究[J]. 电站系统工程, 2012, 28(5): 5-7.
WEN Shan, YAN Wei-ping, WU Wei, et al. A study of the heat transfer inside a circulating fluidized bed boiler[J]. Power Plant System Engineering, 2012, 28(5): 5-7.
- [11] 马素霞, 张建春, 牛建斌, 等. 75 t/h 循环流化床锅炉变工况热态试验研究[J]. 动力工程, 2005, 25(3): 348-351.
MA Su-xia, ZHANG Jian-chun, NIU Jian-bin, et al. Off-design hot-state experimental study of a 75t/h circulating fluidized bed boiler[J]. Power Engineering, 2005, 25(3): 348-351.

(刘瑶 编辑)



MT7 船用燃气轮机的运行特点

《Gas Turbine World》2014~2015 年年度手册揭示了 Rolls-Royce MT7 船舶燃气轮机的运物特点。

该机具有总压比为 16.7:1, 14 级轴流压气机的前 6 级具有几何可变形式的翻转静叶, 用于在不同的运行工况范围内调整空气的流量并改进发动机的性能, 提供精确的发动机控制。

在部分负荷工况下, 这些静叶也提供具有高效率的更有效的变速运行。这也增强了压气机具有迅速加速和减速能力的无喘振性能。

压气机直接被连接到并被轴流式 2 级高压涡轮驱动, 该高压涡轮的特征是 2 级的静叶和动叶都是内部空气冷却的。分开的低压轴是由空气冷却的 2 级轴流式自由动力涡轮驱动的。

MT7 燃气轮机安装有最先进的 FADEC(全权数字电子控制系统), 用于包括先进的故障监测和预测功能的燃油控制。全新设计的 EEC(发动机电子控制器)的主要功能是程序起停、稳定和瞬态控制、监视、故障探测以及超速、振动超限、滑油压力过低和涡轮进口温度过高等状态下的应急停机保护。通过燃油调节阀的调整, 控制器实现燃气轮机输出功率的控制。

(吉桂明 摘译)

the pulverized coal and air flow in the chain grate boiler can obviously enhance the disturbance in the furnace ,the distribution of the temperature in the furnace will be more uniform ,the filling degree of the flame in the furnace will be better ,the temperature of the flue gases in the furnace will increase by about 100 to 200 K as a whole and attain 1 500 to 2 000 K in the high temperature zones ,thus enhancing the thermal efficiency and capacity of the chain grate boiler. **Key words:** chain-grate boiler ,compound combustion ,speed field ,temperature field ,numerical simulation

300 MW 循环流化床锅炉稀相区的传热研究 = **Study of the Heat Transfer in the Sparse Phase Zones of a 300 MW Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊 ,汉]/SUO Jiang-shun ,CUI Zhi-gang (College of Electrical and Power Engineering ,Taiyuan University of Science and Technology ,Taiyuan ,China ,Post Code: 030024) ,HOU Zhi-fu (Shanxi Pingshuo Gangue Power Generation Co. Ltd. ,Shuozhou ,China ,Post Code: 036800) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(9) . -69 ~74

The heat transfer in a CFD boiler burning gangue was studied. With a 300 MW CFD boiler in Shanxi Pingshuo Power Plant serving as an example ,the core-annulus model and particle cluster update model were used to model establish and calculate the distribution of the heat transfer coefficient in the sparse phase zones as the focus. The model thus established has taken account of the actual characteristics of the distribution of the temperature in the circulating fluidized bed in the furnace and was corrected and updated according to the data of the temperature actually measured on the spot. Finally ,changes of the convection and radiation heat exchange coefficient at various loads along the height of the furnace were studied. It has been found that when the boiler is operating at a relatively high load ,the fluctuation in load has relatively small influence on the time-averaged particle cluster wall surface covering share and therefore ,so does the fluctuation in load on the convection heat exchange inside the furnace. The deviation of the temperature in the annulus zones in the furnace along the height of the circulating fluidized bed will somehow decrease and has bigger influence on the radiation heat exchange than on the convection heat exchange. With an increase of the load ,the decline of the convection heat exchange coefficient along the height of the furnace will increase while the decline of the radiation heat exchange coefficient along the height of the furnace will decrease. At a high load ,the total in-furnace heat exchange coefficient along the height of the furnace will decrease by around 25% while at a low load will decrease by about 28% . At a high load ,the temperature difference in the furnace along the height of the furnace will become smaller and the heat transfer will be more stable. **Key words:** underpants-leg type CFD boiler ,gangue ,sparse phase zone ,heat transfer coefficient

基于 LCA 的燃煤锅炉 FGD 超低排放对资源消耗与环境影响评价 = **Resource Consumption of the Ultra Low Emissions from a Coal-fired Boiler in the Process of Flue Gas Desulfurization (FGD) and Evaluation of the Impact on the Environment Based on the Life Cycle Assessment (LCA)** [刊 ,汉]/HAN Tao ,PAN Wei-guo ,WANG Wen-huan (Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) ,DING Cheng-gang (Power Plant Environmental Protection Engineering Co. Ltd. ,Shanghai Electrical Group Corporation ,Shang-