

带排烟余热回收的 CFB 锅炉节能分析

赵 斌¹ 张路涛¹ 吕 太² 闫晨帅²

(1. 河北联合大学 冶金与能源学院 河北 唐山 063009; 2. 东北电力大学 能源与动力工程学院 吉林 吉林 132012)

摘 要: 采用分离式热管空气预热器回收低温烟气余热的 CFB 锅炉系统(简称 RGCFB)建立了烟风阻力、风机电耗和净效率模型。并以京玉电厂 1 号 CFB 锅炉的运行参数为基础,对 CFB 锅炉和 RGCFB 锅炉进行了 4 种工况的热效率和净效率对比分析。结果表明:RGCFB 锅炉较 CFB 锅炉热效率提高了 1.28 ~ 2.23 个百分点,净效率提高 0.51 ~ 1.18 个百分点。最后分析了影响 RGCFB 锅炉净效率的因素,指出了以净效率作为锅炉运行的评价指标,可有效指导锅炉的经济运行。

关 键 词: CFB 锅炉; 排烟余热回收; 理论模型; 净效率; 影响因素; RGCFB(低温烟气 CFB)

中图分类号: TK11⁺5 文献标识码: A

引 言

电站锅炉排烟温度一般在 120℃ 以上,大量低温烟气排放到大气中,如何利用这部分低温烟气余热,人们需要在技术上取得进一步创新和提高^[1]。从目前文献看,一般采用低压省煤器回收利用低温烟气余热,提高锅炉效率,减少燃料的消耗^[2-5]。低温烟气在回收过程中,需要高效的换热器来实现,但传统间壁换热器的应用受换热器冷媒入口温度和烟气酸露点的制约,限制了低温烟气余热回收技术的应用。

基于常规 CFB 锅炉炉内脱硫和热管换热器相变高效传热的特性,提出了带排烟余热回收装置的 CFB(recovery gas - heat of CFB, RGCFB) 锅炉系统^[6],建立了锅炉节能理论模型,并以京玉电厂 330 MW CFB 锅炉运行工况参数为基础,进行了 RGCFB 和 CFB 锅炉效率的对比分析。

1 RGCFB 锅炉系统

带排烟余热回收的 CFB 锅炉是在常规 CFB 锅

炉的尾部烟道空预器下部增加了分离式热管空预器,其蒸发段热管采用倾斜布置,而其冷凝段布置在尾部烟道外的侧面平台上,蒸发段和冷凝段相对应的联箱通过蒸汽上升管和冷凝液下降管连接,构成各自独立的封闭系统。一、二次风机来的冷空气分别进入分离式热管换热器冷凝段预热升温后,再进入原 CFB 锅炉空气预热器。尾部烟道低温烟气经分离式热管换热器蒸发段后,由排烟通道进入除尘器。RGCFB 锅炉系统工艺流程如图 1 所示。

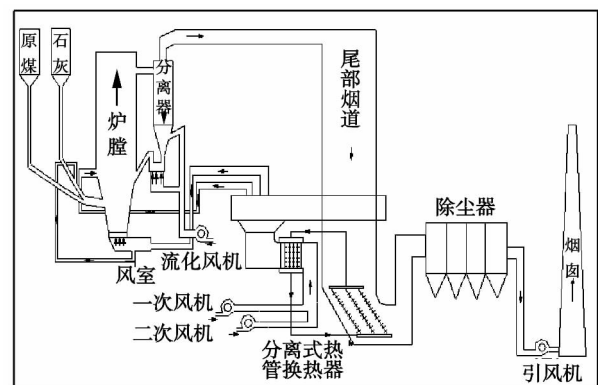


图 1 带排烟余热回收装置的 CFB 锅炉系统流程图

Fig. 1 Chart showing the flow path of a CFB boiler installed with an exhaust flue gas waste heat recovery device

2 理论计算模型

2.1 基本假设

- (1) 忽略一、二次风温提高后对炉内燃烧和传热的影响;
- (2) 假定在工况一定条件下, RGCFB 锅炉与 CFB 锅炉 $q_3 \sim q_6$ 热损失相同。

收稿日期: 2013 - 02 - 04; 修订日期: 2013 - 03 - 22

基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划基金资助项目(11213941)

作者简介: 赵 斌(1968 -), 男, 吉林公主岭人, 河北联合大学教授, 博士。

2.2 增加风机功率计算模型

2.2.1 烟风阻力计算模型

设置分离式热管换热器 烟风阻力为:

$$\Delta p = \zeta \frac{G^2}{\rho} \tag{1}$$

其中:

$$\zeta = \zeta_0 (Z + 1) \tag{2}$$

式中: Δp —烟风阻力 ,Pa; G —烟气质量流量 ,kg/s; ζ —烟道阻力系数; ζ_0 —单排管束的阻力系数; Z —沿介质流动方向管子排数; ρ —烟气密度 ,kg/m³。

2.2.2 风压与电机功率关系模型

电机增加功率计算模型:

$$\Delta P_e = \frac{Q \Delta p}{\eta_a \eta_u \eta_e} \tag{3}$$

式中: ΔP_e —电动机增加功率 ,kW; η_a —风机轴效率 %; η_u —传动效率 %; η_e —电机效率 %; Q —风机的流量 ,m³/h。

2.3 锅炉净效率计算模型

2.3.1 锅炉热效率

锅炉热效率按 GB10184 - 1988 计算 ,以排烟余热回收装置出口烟气温度作为锅炉排烟热损失的基准温度。锅炉热效率:

$$\eta = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \tag{4}$$

其中:

$$q_2 = \frac{V_y c_{py} (\theta_{py} - t_0)}{Q_r} \times 100 \tag{5}$$

式中: q_2 —排烟热损失 %; q_3 —化学不完全燃烧热损失 %; q_4 —机械不完全燃烧热损失 %; q_5 —散热损失 %; q_6 —灰渣物理热损失 %; θ_{py} —排烟温度 ,℃; t_0 —环境温度 ,℃; c_{py} —烟气平均比定压热容 kJ/(kg · °C); V_y —烟气容积 ,m³/kg; Q_r —锅炉输入热量 ,一般取燃料的低位发热量 $Q_{net,ar}$ kJ/kg。

2.3.2 锅炉净效率

RGCFB 锅炉由于排烟热损失 q_2 的降低 ,热效率提高 ,但由于烟风系统阻力增加 ,导致风机电耗增加 ,锅炉热效率不能准确地评价 RGCFB 的节能效益。而锅炉净效率是扣除了辅机电耗后的经济性指标 因此锅炉净效率计算公式化简为^[7]:

$$\eta_j = \eta / \left[1 + \frac{P_{al,zs} \times 10^{-3}}{N \times (1 - \zeta_{apf} \times 10^{-2}) - P_{gl,zs} \times 10^{-3}} \right] \tag{6}$$

其中:

$$P_{gl,zs} = P_{ec} + P_{yf} + P_{yc} \tag{7}$$

式中: η_j —净效率 %; η —热效率 %; $P_{gl,zs}$ —锅炉风机折算总功率 ,kW; N —锅炉负荷 ,MW; ζ_{apf} —锅炉其它辅机厂用电率 % 取 2%; P_{yc} —一次风机功率 ,kW; P_{yf} 为引风机功率 ,kW; P_{ec} —二次风机功率 ,kW。

由式(6)分析可知 ,在锅炉负荷、热损失 $q_3 \sim q_6$ 不变的条件下 降低锅炉排烟温度 提高锅炉热效率 η ,减少锅炉风机电耗 ,可提高锅炉机组净效率。

3 计算实例

3.1 京玉电厂锅炉型号及技术参数

山西京玉发电有限责任公司(简称京玉电厂)装有两台单锅筒自然循环、平衡通风、水冷式旋风气固分离器、滚筒冷渣器排渣 ,型号为 SG - 1178/18.64 - M4504 的亚临界、中间再热的循环流化床锅炉。机组配置 2 台 50% B - MCR 容量汽动给水泵和 1 台 50% B - MCR 容量电动给水泵 在 30% ~ 100% B - MCR 负荷内 ,汽动给水泵运行 电动给水泵备用 ,锅炉主要技术参数如表 1 所示 ,锅炉一、二次风机及引风机主要参数如表 2 所示。

3.2 煤质特性

京玉电厂 CFB 锅炉设计燃料为山西右玉地区的煤矸石和中煤 其配比为 7:3 ,实际燃用煤种以当地洗煤和煤矸石为主。京玉电厂 1 号 CFB 锅炉在 180 MW(工况 I)、230 MW(工况 II)、290 MW(工况 III)和 330 MW(工况 IV) 负荷运行时的煤种元素分析数据如表 3 所示。

表 1 CFB 锅炉的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of the CFB boiler

项目	数值
主汽流量/t · h ⁻¹	1178
主汽压力/MPa	18.64
主汽温度/°C	543
再热蒸汽流量/t · h ⁻¹	996.4
再热蒸汽进口压力/MPa	4.458
再热蒸汽出口压力/MPa	4.231
再热蒸汽进口温度/°C	342
再热蒸汽出口温度/°C	543
给水温度/°C	286
排烟温度/°C	129
锅炉效率/%	90.94

表 2 风机主要参数

Tab. 2 Main nameplate parameters of the fans

项目	一次风机	二次风机	引风机
风机流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	765360	831600	1374984
风机全压/kPa	23.58	17.48	11.60
风机功率/kW	5456.5	4329	4900
风机轴效率/%	84.1	87.23	82.19
电机功率/kW	6000	4550	5150
额定电流/A	644	493	583
电机效率/%	92.5	91.5	87.9
传动效率/%	99.5	99.5	99.5

表 3 设计煤种与燃用煤种元素分析数据

Tab. 3 Data for elementary analysis of the design coal rank and that actually burned

项目	设计煤种	I	II	III	IV
$C_{ar}/\%$	38.00	36.22	35.42	33.91	34.72
$H_{ar}/\%$	2.28	3.46	3.42	3.36	3.45
$O_{ar}/\%$	6.59	11.52	12.84	12.31	10.47
$N_{ar}/\%$	0.68	1.28	1.43	1.37	1.16
$S_{ar}/\%$	2.17	1.3	1.07	1.18	1
$M_{ar}/\%$	6.50	9.2	11.3	10.6	8.1
$A_{ar}/\%$	43.78	37.02	34.53	37.27	41.1
$Q_{net,ar}/MJ \cdot kg^{-1}$	13.69	14.50	13.97	13.48	14.09

3.3 计算条件及结果分析

烟气温度过低易在除尘器中内部电场结露,造成极板、极线腐蚀,降低设备的使用寿命。除尘器入口烟温降到 90℃左右时^[12],其飞灰比电阻从 $10^{12} \Omega \cdot cm$ 下降到 $10^{10} \Omega \cdot cm$,可有效提高除尘器的效率。因此,在不影响除尘器效率的条件下,RGCFB 锅炉排烟温度确定为 90℃,分离式热管换热器阻力计算参数如表 4 所示。

以京玉电厂 1 号 CFB 锅炉 I、II、III、IV 4 种工况运行参数(如表 5 所示)为基础,对 RGCFB 锅炉和 CFB 锅炉的热效率和净效率指标进行计算及分析,结果如表 6 所示。

表 4 分离式热管换热器阻力计算参数

Tab. 4 Resistance calculation parameters of the separation type heat pipe heat exchanger

	ζ_0	Z	ζ
蒸发段	0.36	25	9.36
冷凝段	0.36	13	5.04

表 5 CFB 锅炉变工况运行参数

Tab. 5 Off - design operation condition parameters of the CFB boiler

参数	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV
给煤量/ $t \cdot h^{-1}$	144.0	163.1	206.6	199
主汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	692.8	794.2	1000.9	1071.3
主汽压力/MPa	11.98	14.09	16.5	16.67
主汽温度/℃	528.9	527.2	524.9	544
给水温度/℃	248.7	261.0	274.5	280
排烟温度/℃	123.6	132.3	135.8	131.5
排烟量/ $km^3 \cdot h^{-1}$	2121	2278.3	2611	2614.4
一次风机电流/A	460.9	470.8	555.8	458.9
二次风机电流/A	231	177.5	217.4	299.8
引风机总电流/A	448.7	487.4	646.5	684.4

表 6 CFB 和 RGCFB 锅炉计算效率对比(%)

Tab. 6 Comparison of the calculation efficiency of the CFB boiler and RGCFB one(%)

工况	CFB 锅炉		RGCFB 锅炉	
	热效率	净效率	热效率	净效率
I	88.29	82.82	89.57	83.33
II	88.54	84.28	90.26	85.28
III	87.12	82.98	89.12	84.16
IV	88.69	85.38	91.22	86.29

由表 6 分析可知,锅炉运行热效率低于设计值,锅炉负荷为 180~330 MW 时,加装排烟余热回收装置后 CFB 锅炉热效率提高了 1.28~2.53 个百分点,但由于风机电耗增加,锅炉净效率仅提高了 0.51~1.18 个百分点。

4 RGCFB 锅炉净效率影响因素分析

RGCFB 锅炉通过回收排烟余热和降低排烟热损失 q_2 来提高锅炉效率,其净效率主要影响因素有排烟温度、锅炉负荷及烟风阻力等。

4.1 排烟温度

排烟热损失是电站锅炉中最大的热损失,而排烟温度的高低决定着排烟热损失的大小。因此,选择合理的排烟温度有利于提高机组经济性。以锅炉工况 IV 额定负荷为例,计算不同排烟温度下 RGCFB 锅炉的热效率和净效率,其变化关系如图 2 所示。

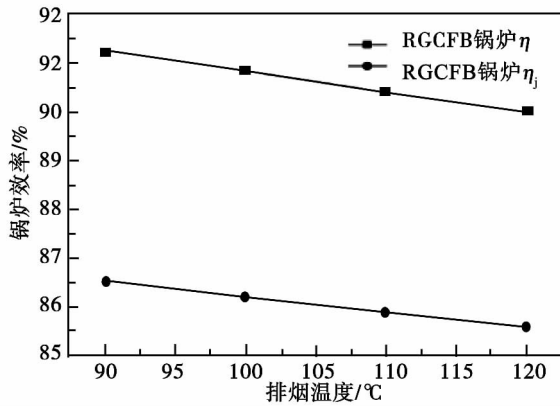


图2 锅炉效率与排烟温度的关系

Fig. 2 Relationship between the boiler efficiency and the exhaust flue gas temperature

由图2分析可知,在煤种和环境温度不变条件下,随排烟温度 θ_{py} 升高,排烟热损失 q_2 增大,导致锅炉热效率和净效率下降。因此, RGCFB 锅炉可以有效地提高锅炉机组的经济性。但如果排烟余热回收装置出口烟气温度选择过小,将引起尾部受热面的低温腐蚀和严重积灰,此外因尾部受热面面积的增加将导致烟气的流动阻力增大,进而引起风机电耗增加,部分抵消了锅炉机组效率的增加值。

4.2 烟风阻力

在确定的排烟温度条件下,合理的换热器结构和布置方式,将减小烟风系统阻力,降低风机电耗,提高锅炉机组净效率。经计算加装排烟余热回收装置后,一、二次风机与引风机电耗变化率随锅炉负荷的关系如图3所示。

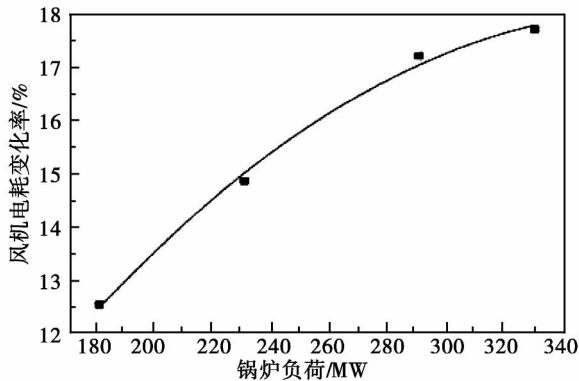


图3 风机电耗变化率与锅炉负荷关系

Fig. 3 Relationship between the power consumption rate of the fans and the boiler load

由图3分析可知,随着 RGCFB 锅炉负荷的增加,烟风阻力增大,风机电耗升高,但变化趋势逐渐变缓。在锅炉工况IV额定负荷运行时,风机电耗增加率达17.6%,校核风机运行功率仍低于额定功率,不需要更换风机。

4.3 锅炉负荷

锅炉负荷变化直接影响锅炉给煤量、排烟温度、厂用电等参数。RGCFB 锅炉机组在负荷变化时,其热效率和净效率均会受到其影响,变化趋势如图4所示。由图4分析可知, RGCFB 锅炉热效率与净效率随负荷的变化较 CFB 锅炉有较大幅度的增加,且随着锅炉负荷的增大其增加幅度总体上呈增大趋势,锅炉负荷在300 MW时,锅炉热效率和净效率增幅较大。

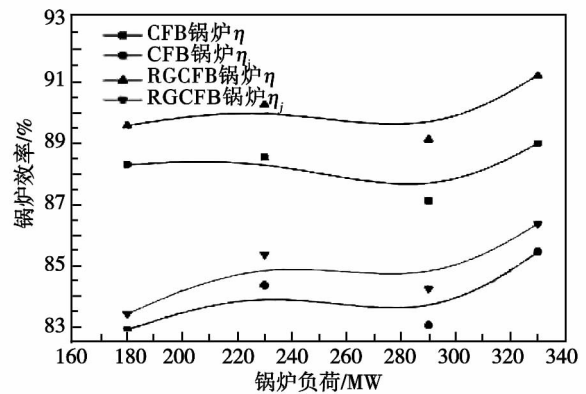


图4 锅炉效率与锅炉负荷关系

Fig. 4 Efficiency of boiler with the change of boiler load

5 结论

以京玉电厂1号CFB锅炉为例,对原CFB和RGCFB锅炉进行了4种工况的效率对比分析。主要结论为:

(1) CFB 锅炉炉内脱硫,其烟气酸露点温度较低,节能潜力较大,通过安装烟气余热回收装置,结合除尘器的运行条件,确定排烟温度为90℃,此方法可为CFB锅炉低温烟气余热回收工艺优化提供数据支持。

(2) CFB 锅炉通过回收烟气余热,在负荷为180~330 MW时,较原CFB锅炉热效率提高了1.28~2.23个百分点,净效率提高了0.51~1.18个百分点,锅炉在230~330 MW负荷工况运行,锅炉经

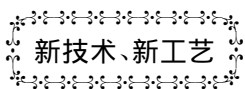
济性较好。

(3) 常规锅炉运行主要以锅炉热效率最高为评价目标,对于安装排烟余热回收装置的锅炉机组,净效率指标更能真实的反映锅炉整体运行的经济性,因此锅炉优化运行及锅炉改造后的性能评价应以锅炉净效率为考核指标。

参考文献:

- [1] 吴华新. 低位烟气余热深度回收利用状况述评[J]. 热能与动力工程, 2012, 27(4): 399-404.
WU Hua-xin. Review of the application status of low quality flue gas waste heat utilization technologies [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2012, 27(4): 399-404.
- [2] 李建锋, 朱超, 冷杰, 等. 降低锅炉排烟温度的 2 种方式比较[J]. 中国电力, 2012, 45(7): 28-33.
LI Jian-feng, ZHU Chao, LENG Jie, et al. Comparison of two modes for lowering the exhaust flue gas temperature of boilers [J]. China Electric Power, 2012, 45(7): 28-33.
- [3] 李清海, 张衍国, 陈勇, 等. 垃圾焚烧电站空气预热器与低压省煤器的组合分析[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 854-858.
LI Qing-hai, ZHANG Yan-guo, CHEN Yong, et al. Analysis of the combination of the air preheater with the low pressure economizer in a MSW incineration power plant [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(6): 854-858.
- [4] 陆万鹏, 孙奉仲, 史月涛, 等. 前置式液相介质空气预热器经济性分析及热力系统优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 6-10.
LU Wan-peng, SUN Feng-zhong, SHI Yue-tao, et al. Cost-effectiveness analysis and thermodynamic system optimization of a front-located liquid phase medium air preheater [J]. Proceeding of China Electric Machinery Engineering, 2011, 31(11): 6-10.
- [5] 黄新元, 孙奉仲, 史月涛. 火电厂热系统增设低压省煤器的节能效果[J]. 热力发电, 2008, 37(3): 56-58.
HUANG Xin-yuan, SUN Feng-zhong, SHI Yue-tao. Energy-saving effectiveness of a thermal power plant additionally installed with a low-pressure economizer [J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(3): 56-58.
- [6] 赵斌, 梁精龙, 武志飞, 等. 冷凝式循环流化床锅炉烟风装置 [P]. 中国, ZL201020556368. 3. 2011.
ZHAO Bin, LIANG Jing-long, WU Zhi-fei, et al. Condensing type CFB boiler flue gas-air device [P]. China, ZL201020556368. 3. 2011.
- [7] 赵晴川, 李建生, 渠富元, 等. 正交试验法在燃煤电站锅炉燃烧优化中的应用[J]. 华东电力, 2008, 36(8): 80-84.
ZHAO Qing-chuan, LI Jian-sheng, QU Fu-yuan, et al. Application of the orthogonal test method in the combustion optimization of coal-fired utility boilers [J]. East China Electric Power, 2008, 36(8): 80-84.

(丛敏 编辑)



新技术、新工艺

LM2500 + G4 将驱动多用途护卫舰

据《Gas Turbine World》2013 年 3-4 月刊报道,GE Marine 最近交付 1 台 LM2500 + G4 船舶燃气轮机,它将驱动法国海军的第 8 艘 FREMM 护卫舰 Lorraine。

该护卫舰被设计成以防空、反潜和对舰战形式作战,并且能实行对陆地目标饱和的打击。

意大利-法国的 FREMM 计划标明了 GE 的 35 MW LM2500 + G4 燃气轮机在船用部分的第一个应用,该燃气轮机具有比它的前任 LM2500 + 多出 17% 的功率。

18 台 LM2500 + G4 燃气轮机将为目前的 FREMM 计划提供推进,该计划包括用于意大利海军的 6 艘该型护卫舰,用于法国海军的 11 艘舰,用于摩洛哥海军的一艘舰。

利用液体燃料,LM2500 + G4 船用燃气轮机的额定连续功率为 35 338 kW,耗油率为 0.214 kg/kWh(相当于 39.5% 的效率)。

(吉桂明 摘译)

In the light of the problem that it has no way to directly measure the residual carbon content of a circulating fluidized bed boiler, presented was a method for indirectly measuring the residual carbon content by using the information about the air quantity and coal quantity which can be easily measured. First, through an analysis of the mechanism, established was a model governing the dynamic mechanism of the residual carbon content, capable of real-time reflecting the combustion conditions inside the furnace. Then, based on the generalized Kalman filtering theory, an information fusion algorithm was determined and the coal quantity and total air quantity fed were used to accurately calculate the residual carbon content inside the furnace. Finally, a test verification was performed on a 300 MW unit in a power plant and a contrast of the heat quantity, bed temperature and oxygen quantity thus calculated according to the residual carbon content with the real values showed that the error does not exceed 2% when the load changes in the range from 95% to 65%, proving that the residual carbon content in a circulating fluidized bed boiler can be accurately predicted by using the generalized Kalman information fusion method. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, generalized Kalman filtering, residual carbon content, mechanism model, heat quantity

带排烟余热回收的 CFB 锅炉节能分析 = **Energy-saving Analysis of a CFB boiler with the Waste Heat Recovered from the Exhaust Gases** [刊, 汉] ZHAO Bin, ZHANG Lu-tao (College of Metallurgy and Energy Source, Hebei United University, Tangshan, China, Post Code: 063009), LU Tai, YAN Chen-shuai (College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013, 28(5). -497 ~ 501

Presented was a CFB boiler system (referred to as RGCFB for short) for recovering the low temperature flue gas waste heat by utilizing a separation type heat pipe air preheater and established was a model for calculating the flue gas and air resistance, fan power consumption rate and net efficiency. On the basis of the operating parameters of No. 1 CFB boiler in Jingyu power plant, a contrast and analysis were performed of the thermal efficiency and net efficiency of the CFB and RGCFB boiler under four operating conditions. The research results show that the thermal efficiency of the RGCFB boiler is 1.28 to 2.23 percentagepoints higher than that of the CFB boiler and the net efficiency is 0.51 to 1.18 percentage points higher than that of the CFB boiler. Finally, the factors influencing the net efficiency of the RGCFB boiler were analyzed and the fact that to use the net efficiency as an index for evaluating the operation of a boiler can effectively guide the economic operation of the boiler was pointed out. **Key words:** CFB boiler, exhaust gas waste heat recovery, theoretical model, net efficiency, influencing factor

往复多孔介质加热炉半预混燃烧混合特性研究 = **Study of the Semi-premixed Combustion Mixed Charac-**