

高温型 CFB 锅炉关键技术与设计方案研究

孙献斌, 林伟荣, 韩 应, 刘海峰, 赵鹏勃, 金森旺, 时正海, 王海涛
(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

[摘 要] 为提高燃用难燃煤种的循环流化床(CFB)锅炉的燃烧效率, 提出了高温型 CFB 锅炉的技术概念, 建立了高温型 CFB 试验研究平台, 在该 CFB 试验台上研究了难燃煤种的高温燃烧及污染物排放特性。试验结果表明, 炉内燃烧温度提高可较明显地降低难燃煤种的飞灰可燃物质量分数, 提高燃烧效率; 但随着运行床温的升高, 脱硫效率下降, NO_x 排放值有所增加。在试验研究的基础上, 对高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉技术方案进行了设计研究, 并对锅炉方案中的 6 个旋风分离器的灰颗粒流量分配特性进行了数值模拟, 确定了旋风分离器的优化布置方式, 为后续的高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉结构设计及工程应用奠定了技术基础。

[关 键 词] 高温型; CFB 锅炉; 燃烧特性; 污染物排放; 超超临界参数; 旋风分离器; 灰颗粒流量; 分配特性

[中图分类号] TK222; TK223 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfid.201911068

[引用本文格式] 孙献斌, 林伟荣, 韩应, 等. 高温型 CFB 锅炉关键技术与设计方案研究[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 1-6. SUN Xianbin, LIN Weirong, HAN Ying, et al. Research on key technologies and design plan of high-temperature CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 1-6.

Research on key technologies and design plan of high-temperature CFB boiler

SUN Xianbin, LIN Weirong, HAN Ying, LIU Haifeng, ZHAO Pengbo, JIN Senwang,
SHI Zhenghai, WANG Haitao

(Clean Energy Research Institute Co., Ltd., China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In order to improve the combustion efficiency of circulating fluidized bed (CFB) boiler firing hard-to-burn coal, the technical concept of high-temperature CFB boiler was put forward, and a high-temperature CFB experimental research platform was established. Moreover, high-temperature combustion and pollutant emission characteristics were researched in the CFB test facility for hard-to-burn coal. The experimental result shows that, increasing the combustion temperature can obviously reduce combustible matter mass fraction in fly ash and increase the combustion efficiency for hard-to-burn coal. However, as the operating bed temperature increases, the desulfurization efficiency decreases and the NO_x emission increases. Based on experimental research result, technical plan of ultra-supercritical 660 MW high-temperature CFB boiler was designed and researched, and the distribution characteristics of ash particle flow of six cyclone separators in the boiler scheme was simulated numerically. Finally, the optimum layout of cyclone separators was determined, which laid a technical foundation for the subsequent structural design and engineering application of ultra-supercritical 660 MW high-temperature CFB boiler.

Key words: high-temperature, CFB boiler, combustion characteristics, pollutant emission, ultra-supercritical parameter, cyclone separator, ash particle flow, distribution characteristics

为解决常规电站锅炉及“W”火焰锅炉在燃用难燃煤种时存在燃烧效率低、 NO_x 排放值高的技术难题, 国家“十二五”科技支撑计划“CFB 锅炉燃用难燃煤种的研究”课题提出了开发高温型 CFB

锅炉的技术方向, 即将 CFB 锅炉炉膛燃烧温度由通常的 850 °C 左右提高到 920~1 050 °C, 以提高飞灰可燃物的燃尽率, 达到提高燃烧效率的目的^[1-2]。该项研究工作针对无烟煤等难燃煤种(干燥无灰基

收稿日期: 2019-11-01

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题资助(2012BAA02B02)

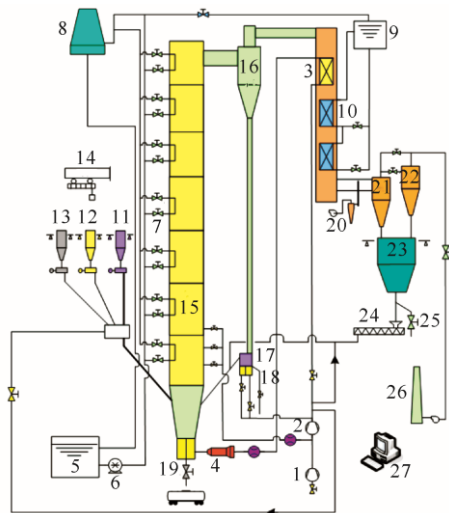
Supported by: Key Project of the National Twelfth-Five Year Research Program of China (2012BAA02B02)

第一作者简介: 孙献斌(1963), 男, 硕士, 研究员, 中国华能集团清洁能源技术研究院首席科学家, 主要研究方向为循环流化床锅炉及清洁煤发电技术, xb_sun@qny.chng.com.cn.

挥发分 $w_{\text{daf}}(\text{V}) \leq 13\%$), 在高温型 CFB 试验台上, 对高温型 CFB 锅炉关键技术进行试验研究, 掌握了难燃煤种在高温 CFB 条件下的燃烧特性及污染物排放特性, 提出了提高难燃煤种 CFB 锅炉燃烧效率的方法。同时, 对高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉技术方案进行了设计研究, 为后续的锅炉结构设计及工程示范奠定了技术基础。

1 难燃煤种高温燃烧特性

图 1 为 1 MW 高温型 CFB 试验台。在该试验装置上对 4 种难燃煤种 (LY 无烟煤、YC 无烟煤, YQ 无烟煤、JZ 无烟煤) 进行了试验研究。试验煤质特性见表 1。试验期间入炉煤最大粒径 $d_{\text{max}}=8 \text{ mm}$, 中位径 $d_{50}=1.4 \sim 1.8 \text{ mm}$ 。试验研究结果如图 2 所示。



1—送风机; 2—升压风机; 3—一次风空气预热器; 4—风道燃烧器; 5—总水箱; 6—给水泵; 7—燃烧室水冷受热面; 8—冷水塔; 9—高位水箱; 10—尾部水冷受热面; 11—灰仓; 12—石灰石仓; 13—煤仓; 14—吊车; 15—燃烧室; 16—高温分离器; 17—回灰控制器; 18—循环灰排放器; 19—排渣器; 20—飞灰取样器; 21—一级除尘器; 22—二级除尘器; 23—灰仓; 24—飞灰回送装置; 25—引风机; 26—烟囱; 27—工业用数据采集系统。

图 1 1 MW 高温型 CFB 试验台
Fig.1 The 1 MW high-temperature CFB test facility

表 1 试验煤质特性
Tab.1 The properties of test coal

项目	LY 无烟煤	YQ 无烟煤	YC 无烟煤	JZ 无烟煤
$w_1(\text{M})/\%$	8.70	3.70	6.40	11.0
$w_{\text{ar}}(\text{A})/\%$	28.31	23.26	18.68	22.48
$w_{\text{daf}}(\text{V})/\%$	6.79	9.26	7.51	8.78
$w_{\text{ar}}(\text{C})/\%$	58.13	65.95	69.21	59.80
$w_{\text{ar}}(\text{H})/\%$	1.41	2.79	2.59	2.04
$w_{\text{ar}}(\text{O})/\%$	2.08	1.07	1.95	3.68
$w_{\text{ar}}(\text{N})/\%$	0.47	1.25	0.88	0.74
$w_{\text{ar}}(\text{S})/\%$	0.90	1.98	0.29	0.27
$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ kg}^{-1})$	20.43	24.45	25.15	22.12

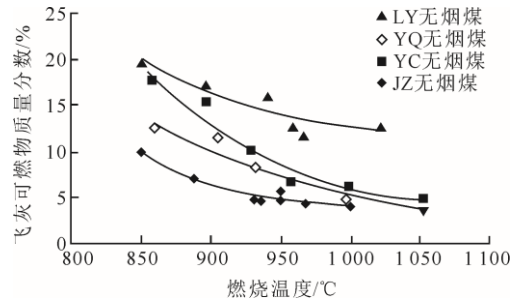


图 2 飞灰可燃物质量分数与 CFB 燃烧温度关系
Fig.2 The relationship between carbon content of fly ash and combustion temperature in furnace

由图 2 可以看出: 采用高温 CFB 燃烧方式, 随着燃烧温度的提高, 4 种无烟煤飞灰可燃物质量分数均呈下降趋势; 当燃烧温度从 890 °C 提高到 970 °C 时, 试验煤种的飞灰可燃物质量分数降低了 4.04%~9.09% (绝对值), 燃烧效率相应提高 0.79%~3.58% (绝对值)。4 种无烟煤的燃烧效率平均值从 95.22% 提高至 97.31%, 难燃煤种的燃烧效率明显提高。

2 难燃煤种污染物排放特性

以较典型的 YC 无烟煤作为进一步研究污染排放特性的煤种, 其折算硫分 $S_{\text{zs}}=0.11 \text{ g/MJ}$, 在 $n(\text{Ca})/n(\text{S})=2.2$ 的条件下, CFB 炉内燃烧温度对 SO_2 排放及脱硫效率的影响规律试验结果如图 3 所示。

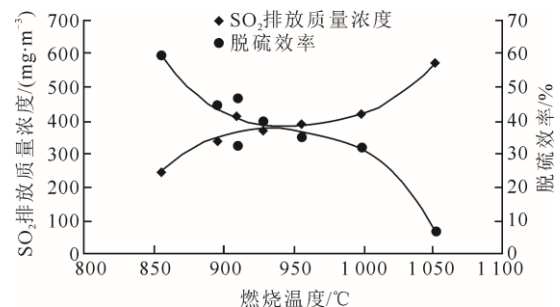


图 3 脱硫效率及 SO_2 排放质量浓度与燃烧温度关系
Fig.3 The relationship between desulfurization efficiency and SO_2 emission and combustion temperature

由图 3 可以看出: 随着床温的升高, SO_2 排放质量浓度增高, 脱硫效率降低; 在 855 °C 左右时脱硫效率最高, 床温在 895~1000 °C 之间, SO_2 排放质量浓度缓慢上升; 床温高于 1000 °C 时, SO_2 排放质量浓度逐步增高, 脱硫效率下降较快。在床温 1000 °C 时, YC 无烟煤 SO_2 排放质量浓度为 419 mg/m^3 (标准状态, $\varphi(\text{O}_2)=6\%$, 下同)。要满足 $\rho(\text{SO}_2) \leq 35 \text{ mg/m}^3$ 超低排放的要求, 须在 CFB 锅炉出口采取脱硫效率不低于 91.6% 的尾部烟气脱硫 (FGD) 装置。已有的工程应用实例表明, 在 CFB

锅炉出口 SO₂ 排放质量浓度未达到排放标准要求时, 采用在炉外加置 FGD 装置构成两级脱硫工艺在技术上是可行的^[3]。

YC 无烟煤的折算氮含量 $N_{zs}=0.39$ g/MJ, 此值在 4 种无烟煤种中仅次于 LY 无烟煤 (0.51 g/MJ)。在折算氮含量 $N_{zs}=0.39$ g/MJ, $n(\text{Ca})/n(\text{S})=2.2$ 的条件下, YC 无烟煤燃烧温度与 NO_x 排放质量浓度的关系如图 4 所示。

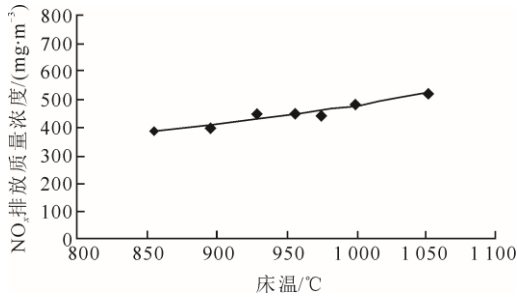


图 4 燃烧温度与 NO_x 排放质量浓度关系
Fig.4 The relationship between combustion temperature and NO_x emission mass concentration

由图 4 可以看出: 随着床温的升高, NO_x 排放质量浓度呈现上升趋势; 床温 890 °C 时, NO_x 排放质量浓度为 400 mg/m³, 床温升至 975 °C 时, NO_x 排放质量浓度增至 441 mg/m³; 床温升至 1 050 °C 时, NO_x 排放质量浓度增至 520 mg/m³。

燃煤锅炉中生成的 NO_x 主要来源于燃料中的氮和燃烧空气中的氮, 主要可分为热力型 NO_x、快速型 NO_x 和燃料型 NO_x^[4-6] 3 种。在温度低于 1 350 °C 时几乎没有热力型 NO_x 生成, 而快速型 NO_x 只在对不含氮的碳氢燃料在较低温度下燃烧时才重点考虑。因此, 燃料型 NO_x 是 CFB 锅炉中生成的 NO_x 的主要构成^[5]。燃料型 NO_x 来源于燃料氮, 无论是挥发分还是焦炭在燃烧阶段都会形成 NO_x。研究及试验结果表明: 随着燃烧温度的升高, 燃料氮转化率不断升高^[7]; 975 °C 时的 NO_x 排放质量浓度是 890 °C 时的 1.1 倍, 1 050 °C 时的 NO_x 排放质量浓度是 890 °C 时的 1.3 倍。在实际锅炉设计时, 如将炉膛温度控制在 920~975 °C 范围内, 则通过在炉膛出口设置脱硝效率不低于 88.6% 的高效 SNCR 脱硝系统, 可将最终 NO_x 排放质量浓度控制在 50 mg/m³ 以下。

3 高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉方案

基于对高温型 CFB 锅炉关键技术试验研究的结

果, 并借鉴国内外大容量 CFB 锅炉工程应用经验^[8-15], 研究设计的高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉技术方案如图 5 所示。

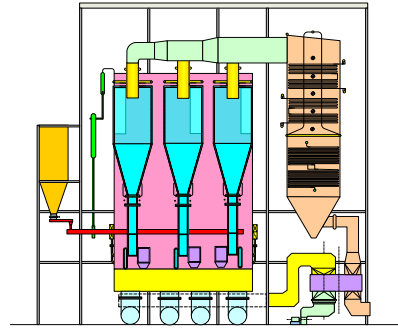


图 5 高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉结构
Fig.5 The configuration of USC high-temperature 60 MW CFB boiler

锅炉整体布置采用 6 个旋风分离器分置于炉膛两侧的 H 型结构。燃用煤质按 YC 无烟煤设计, 该无烟煤干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)=7.51\%$, 低位发热量 $Q_{net,v,ar}=25.15$ MJ/kg, 折算硫分 $S_{zs}=0.11$ g/MJ, 折算氮 $N_{zs}=0.39$ g/MJ, 属低硫分、氮含量偏高的难燃煤种。锅炉设计时根据试验研究结果, 重点考虑了炉膛温度与燃烧效率的关系, 在提高炉膛温度的同时, 兼顾了污染物排放特性。

图 6 为燃烧温度与燃烧效率、SO₂ 及 NO_x 排放质量浓度的关系曲线。由图 6 可以看出, 在燃烧温度为 950~1 000 °C 时, 燃烧效率进入高效区间 ($\geq 98.85\%$), 且 SO₂ 及 NO_x 排放质量浓度上升较为缓慢, 因此, 炉膛燃烧温度按此合理温度区间的中间值 975 °C 设计。锅炉主要设计参数见表 2。

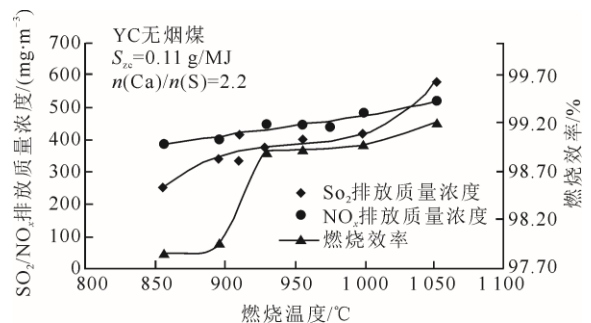


图 6 燃烧温度与燃烧效率、SO₂ 及 NO_x 排放质量浓度关系
Fig.6 The relationship between combustion temperature, combustion efficiency and SO₂ and NO_x emission mass concentration

高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉为变压运行直流炉, 炉膛为单炉膛、单布风板结构, 水冷壁采

用垂直管圈低质量流速技术, 炉膛底部的水冷布风板上布置环形稳流型风帽, 炉膛高度 55 m, 截面热负荷设计值为 3.52 MW/m², 锅炉主要尺寸见表 3。

表 2 高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉设计参数
Tab.2 The design parameters of USC high-temperature 660 MW CFB boiler

项目	设计值(BMCR)
额定蒸发量 $D/(t \cdot h^{-1})$	1914
主蒸汽压力 p_{gr}/MPa	29.4
主蒸汽温度 $t_{gr}/^{\circ}C$	605
再热蒸汽流量 $D_{r1}/(t \cdot h^{-1})$	1621
再热蒸汽进口压力 p_{r1}/MPa	6.16
再热蒸汽出口压力 p_{r2}/MPa	5.96
再热蒸汽进口温度 $t_{r1}/^{\circ}C$	365
再热蒸汽出口温度 $t_{r2}/^{\circ}C$	623
给水温度 $t_{gs}/^{\circ}C$	302
锅炉热效率 $\eta_{gl}/\%$	93.56
排烟温度 $\theta_{py}/^{\circ}C$	125
一次风温 $t_{k1}/^{\circ}C$	300
二次风温 $t_{k2}/^{\circ}C$	300
钙硫摩尔比	2.2
SO ₂ 排放值 $C_{SO_2}^0/(mg \cdot m^{-3})$	30
NO _x 排放值 $C_{NO_x}^0/(mg \cdot m^{-3})$	45
最低不投油稳燃负荷/ $\%$ BMCR	30

表 3 高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉基本尺寸 单位: mm
Tab.3 The basic dimension of the USC high-temperature 660 MW CFB boiler

项目	数值
布风板标高	10 000
炉膛顶部标高	66 000
锅炉炉顶部标高	85 000
运转平台标高	12 000
锅炉宽度(柱中心线)	50 400
锅炉深度(柱中心线)	77 190
汽冷旋风分离器直径	8 200
炉膛高度	55 000

炉膛水冷壁换热系数按已建立的关联模型进行计算^[16], 即

$$h_2 = 3.21\rho_{sus}^{\alpha} T_b^{0.388} \quad (1)$$

式中: h_2 为换热系数, W/(m²·°C); T_b 为炉膛温度, °C; ρ_{sus} 为悬浮颗粒质量浓度, kg/m³; α 为悬浮颗粒质量浓度指数。

图 7 为锅炉的汽水流程。尾部烟道内自上而下依次布置一级过热器、低温再热器及省煤器。与旋风分离器连接的立管下端的 6 个气动均流换热床 (CHE) 内, 分别布置二级过热器冷段、热段受热面及高温再热器。炉膛内与两侧墙垂直方向布置 14 片屏式高温过热器及 10 片翼形水冷屏。锅炉的

旋风分离器内径为 8.2 m, 采用长筒体包覆式结构, 其包覆受热面壳体为初级过热器, 内壁敷设超高强度耐磨耐火材料。

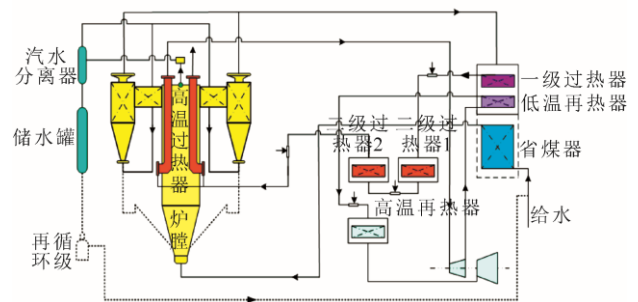


图 7 锅炉汽水系统

Fig.7 The steam and water system of the boiler

气动均流换热床内受热面的换热系数按已建立的关联模型进行计算^[17], 即

$$h_2 = 7.1t_b^{\nu} u_f^{\beta} \quad (2)$$

式中: h_2 为换热系数, W/(m²·°C); t_b 为换热床受热面区域的床温, °C; ν 为温度指数; u_f 为流化速度, m/s; β 为速度指数。

为了保证 NO_x 排放质量浓度能达到超低排放水平, 在旋风分离器入口布置有高效 SNCR 脱硝系统。

4 旋风分离器流量分配特性数值模拟

旋风分离器是 CFB 锅炉的关键部件, 高温型 CFB 锅炉由于炉膛出口温度高于常规 CFB 锅炉 (850~920 °C), 温度升高会使烟气黏度变大, 颗粒受到的向心曳力增大, 于是分离效率会下降^[7]; 而且, 已有的 CFB 锅炉运行表明, 3 个分离器布置在炉膛同侧, 分离器之间存在着流量分配不均匀性, 这种流量分配特性会影响床温的均匀性^[18], 不利于 NO_x 及 SO₂ 的控制。因此, 需要从旋风分离器入口流场分布等方面研究改善分配均匀性和保证高温旋风分离器的性能。

针对高温型 660 MW 超超临界 CFB 锅炉 6 个旋风分离器的 3 种布置方案进行了数值模拟研究, 重点分析了分离器内颗粒运动轨迹与颗粒流量的分配特性, 并对布置方案进行了优化研究。

数值模拟使用 SolidWorks 软件对旋风分离器进行 3D 建模, 用 ICEM 处理软件进行网格划分, 用 Fluent 软件进行数值计算。图 8 为数值模拟得到的 3 种布置方案的分离器入口中心高度截面的颗粒质量浓度分布。

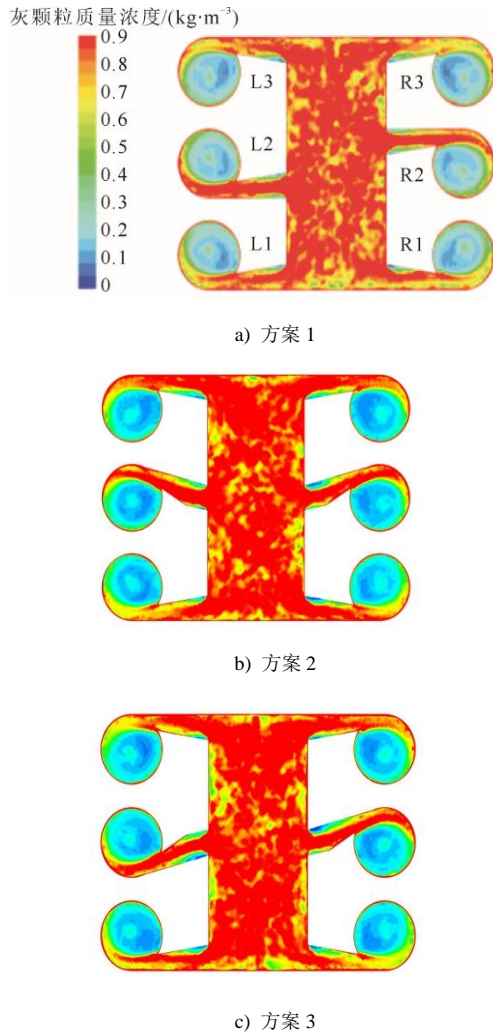


图 8 炉膛出口区域截面灰颗粒质量浓度分布
Fig.8 The distribution of ash particles concentration in furnace outlet area section

从图 8 可以看出：

1) 方案 1 中，中间 2 个分离器灰颗粒质量浓度更高更集中，显示该入口处灰颗粒流量更大。但颗粒流沿水平烟道中间区域进入分离器，该布置不利于分离器内颗粒的分离。

2) 方案 2 中，改变分离器水平烟道形状，并布置成轴对称方式，使得 6 个分离器入口灰颗粒质量浓度分布整体较均匀，但中间 2 个分离器，颗粒流也没有贴着水平烟道外侧进入分离器。

3) 方案 3 将方案 2 改为中心对称布置方式，分离器 L2 水平烟道内颗粒流得到改善，颗粒流从烟道内侧向外侧偏转，但幅度有限，整体上颗粒流并未沿着烟道外侧进入分离器。

4) 3 种布置方案整体上中间 2 个分离器的灰颗粒质量浓度稍大于炉膛四角上的 4 个分离器。

图 9 给出了 3 种布置方案的各个分离器入口的

颗粒流量分配值。由图 9 可以看出，方案 2 中 6 个分离器入口颗粒流量分配整体较均匀，最大流量偏差为 2.37%。右侧中间分离器颗粒流量最高，较平均流量高出 9.0 kg/s。根据以上数值模拟结果，选取方案 2 的布置方式作为锅炉旋风分离器布置的优选方案。

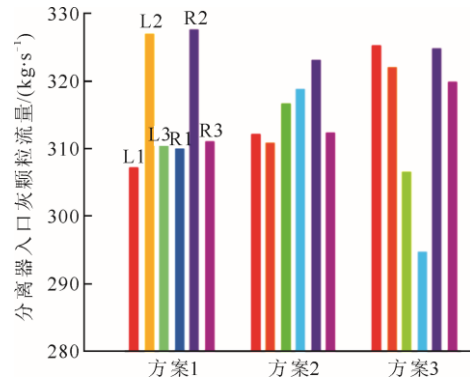


图 9 各旋风分离器入口灰颗粒流量分配
Fig.9 The flow distribution of ash particles at inlet of each cyclone

5 结 论

1) 高温型 CFB 锅炉燃烧技术可有效降低难燃煤种飞灰可燃物含量，提高燃烧效率。

2) 本文研究设计的高温型超超临界 660 MW CFB 锅炉技术方案中，主蒸汽温度 605 °C，再热蒸汽温度 623 °C，炉膛温度 975 °C，锅炉整体为 H 型布置方式，采用单炉膛、单布风板结构，热循环回路带有气动均流换热床。锅炉热效率设计值 93.56%。

3) 数值模拟对 6 个旋风分离器的布置方式优化后，各分离器入口颗粒流量最大偏差为 2.37%，分布较为均匀。该高温型 CFB 锅炉技术方案为超超临界 660 MW CFB 锅炉的工程应用奠定了良好的技术基础。

[参 考 文 献]

[1] 蒋敏华. 实施“厂网分开、竞争上网”改革后发电公司的技术取向[J]. 热力发电, 2003, 32(1): 2-5.
JIANG Minhua. Technological orientation of power generation companies after implanting the reform of “separating power-generating plants form power grids, and supplying power of the grids by competition”[J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(1): 2-5.

[2] CFB 锅炉燃用难燃煤种的研究[R]. 北京: 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 2016: 1-2.
Research on CFB boiler burning hard-to-burn coal[R]. Beijing: China Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd., 2016: 1-2.

[3] 金森旺, 刘彬, 惠艳, 等. 300 MW CFB 锅炉提高 SO₂ 超低排放经济性试验研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 77-83.

- JIN Senwang, LIU Bin, HUI Yan, et al. Experimental study on improving the SO₂ ultra low emission economy of 300 MW CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 77-83.
- [4] 金森旺, 高洪培, 孙献斌, 等. 超临界 600 MW 循环流化床锅炉燃用不同煤种燃烧特性及排放特性试验[J]. 热力发电, 2017, 46(4): 46-51.
- JIN Senwang, GAO Hongpei, SUN Xianbin, et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of a supercritical 600 MW unit CFB boiler firing different coals[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(4): 46-51.
- [5] 刘志强, 刘青, 蒋文斌, 等. 循环流化床锅炉 SO₂ 和 NO_x 排放的影响规律研究[J]. 锅炉技术, 2013, 44(5): 23-27.
- LIU Zhiqiang, LIU Qing, JIANG Wenbin, et al. The effect of the emission in circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2013, 44(5): 23-27.
- [6] 孙献斌, 时正海, 金森旺. 循环流化床锅炉超低排放技术研究[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 155-157.
- SUN Xianbin, SHI Zhenghai, JIN Senwang. Research on ultra-low emission technology for CFB boilers[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 155-157.
- [7] 孙献斌, 黄中. 大型循环流化床锅炉技术与工程应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 58-59.
- SUN Xianbin, HUANG Zhong. Large scale circulating fluidized bed boiler: technology and engineering application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 58-59.
- [8] JÄNTTI T, PARKKONEN R. Lagisza 460 MWe supercritical CFB: experience during first year after start of commercial operation[C]//Russia Power, Moscow, Russia, 2010: 1-20.
- [9] JÄNTTI T, NUORTIMO K, RUUSKANEN M, et al. Samcheok Green Power 4×550 MWe supercritical circulating fluidized-bed steam generators in South Korea[C]//PowerGen Europe, Colon, Germany, 2012: 1-15.
- [10] ROBERTSON A, GOIDICH S, FAN Z. 1 300 °F 800 MWe USC CFB boiler design study[C]//The 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Xi'an, China. 2009: 125-131.
- [11] 孙献斌, 于龙, 时正海, 等. 国产 330 MW CFB 锅炉设计研究[J]. 热力发电, 2009, 38(11): 19-22.
- SUN Xianbin, YU Long, SHI Zhenghai, et al. Study on design of the first home-made CFB boiler used for 330 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(11): 19-22.
- [12] 孙献斌, 石波, 时正海, 等. 国产 330 MW CFB 锅炉调节及变负荷性能[J]. 中国电力, 2013, 46(9): 16-20.
- SUN Xianbin, SHI Bo, SHI Zhenghai, et al. Regulation and variable load performance of domestic 330 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Electric Power, 2013, 46(9): 16-20.
- [13] 聂立, 王鹏, 彭雷, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉的设计[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 701-706.
- NIE Li, WANG Peng, PENG Lei, et al. Design of 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(5): 701-706.
- [14] 严谨, 卢啸风, 王泉海, 等. 600 MW 超临界 CFB 锅炉稀相区燃烧均匀性的实炉试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 397-405.
- YAN Jin, LU Xiaofeng, WANG Quanhai, et al. Field tests on combustion uniformity of the dilute phase in a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 397-405.
- [15] 雷秀坚. 600 MW 超临界 CFB 锅炉风道燃烧器结构改进研究[J]. 中国电力, 2013, 46(9): 24-28.
- LEI Xiujian. Research on improvement of the air duct burner of a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Electric Power, 2013, 46(9): 24-28.
- [16] 孙献斌, 刘海峰, 王海涛, 等. 高温型 CFB 锅炉炉膛传热系数的试验研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(5): 351-354.
- SUN Xianbin, LIU Haifeng, WANG Haitao, et al. Experiment and empirical correlation of heat transfer coefficient in furnace of high temperature CFB boiler[J]. Journal of Power Engineering, 2014, 34(5): 351-354.
- [17] 孙献斌, 时正海, 金森旺, 等. 循环流化床锅炉外置床传热系数的测定与关联[J]. 热力发电, 2014, 43(1): 115-117.
- SUN Xianbin, SHI Zhenghai, JIN Senwang et al. Measurement and empirical correlation of heat transfer coefficient in external heat exchanger of CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(1): 115-117.
- [18] 黄中, 郭钦星, 梁进林, 等. 300 MW CFB 锅炉床温偏差大原因分析及与改造[J]. 热力发电, 2016, 45(11): 68-74.
- HUANG Zhong, GUO Taixing, LIANG Jinlin, et al. Uniformity improvement for bed temperature of a 300 MW unit CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 68-74.

(责任编辑 马昕红)