

超临界循环流化床锅炉技术特点比较

张 纆¹, 别如山¹, 王凤君², 姜孝国²

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要: 为总结超临界循环流化床(CFB)锅炉技术特点, 分析了超临界锅炉参数的选择及循环流化床锅炉比煤粉炉更适合采用超临界参数的原因, 详细介绍了国内外超临界 CFB 锅炉的研究现状。以国内三家锅炉厂针对白马项目提出的超临界 600 MW CFB 锅炉方案为例, 进行分析比较, 认为超临界 CFB 锅炉的设计不存在颠覆性的技术障碍, 而且超临界循环流化床燃烧技术将成为我国燃煤电厂重要的洁净煤发电技术, 但随着超临界 CFB 锅炉研发工作的深入, 仍有一些问题需进一步研究探讨。

关键词: 循环流化床锅炉; 超临界; 水冷壁; 技术特点

中图分类号: TK229
文献标识码: A

引言

自从 20 世纪 80 年代, 循环流化床(CFB)锅炉技术商业化过程中显示出其优良的环境排放特性, 其污染控制成本是目前其它技术无法相比的, 但在达到较高的供电效率方面并未具有明显的优越性, 因此提高蒸汽的压力和温度并增加其容量已成为广泛共识。

随着 CFB 锅炉大型化的发展和 250 MW CFB 锅炉的顺利运行, 国际上在 20 世纪末展开了超临界 CFB 锅炉的研究, 美国 Foster Wheeler (FW) 公司、Stein 公司

和 ABB-CE 公司分别提出了自己的锅炉方案。ABB-CE 公司、Stein 公司现已加盟 Alstom 公司, 合并后的 Alstom 整合原来各公司的技术, 正在积极策划超临界 CFB 锅炉示范工程。

近年来, 国内 300 MW 等级燃煤 CFB 锅炉相继成功投入商业运行, 为提高我国自主创新能力, 加快自主研发, 中国准备在四川白马电厂建设目前世界上最大容量超临界 600 MW CFB 锅炉试验电站, 哈锅、东锅、上锅三大锅炉厂与科研院所合作, 分别提出了锅炉方案。CFB 锅炉及超临界均是成熟技术, 二者的结合相对技术风险不大, 结合后的技术综合了 CFB 低成本污染控制及高供电效率两个特点, 是一个具有明显优势的燃煤发电技术。

在分析超临界锅炉参数选择以及超临界 CFB 锅炉主要技术特点的基础上, 介绍了国外超临界 CFB 锅炉的研发现状, 并将三家锅炉厂针对白马项目提出的方案进行比较分析, 提出超临界 CFB 锅炉研发过程中可能遇到的主要问题。

1 超临界循环流化床锅炉的参数选择

提高锅炉参数可以提高朗肯循环的热效率, 在高温时更为显

著, 如图 1 所示^[1], 在其它参数相同时, 600 MW 机组压力从 16.7 MPa 提高到 24.6 MPa 时, 机组热耗可以降低 1.8%, 此时设备投资约增加 2%。分析国际上超临界技术发展过程可以发现, 超临界机组的参数为压力 25 MPa 左右, 蒸汽温度 538~600 °C。随着材料技术的发展, 超临界机组的可靠性不断提高, 温度参数趋于提高, 达到 580~600 °C。在提高蒸汽温度的同时, 压力也提高到 27 MPa, 出现超超临界参数。再热系统的参数有两种选择, 即更高的再热温度(如 600 °C 以上)或二次再热。采用二次再热可使机组的热效率提高 1%~2%, 与此同时, 调温方式和受热面布置的复杂性导致成本明显提高, 因此趋向于采用一次再热。随着亚临界参数 CFB 锅炉的相继成功投运, 为超临界参数 CFB 锅炉的研发奠定了坚实的基础。

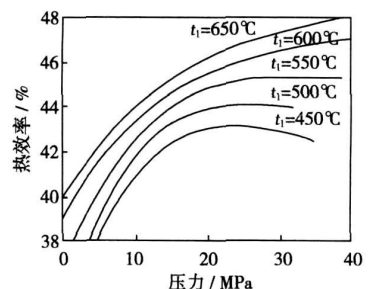


图 1 朗肯循环的热效率

2 超临界 CFB 锅炉主要技术特点^[2]

2.1 超临界 CFB 锅炉的可行性

在超临界煤粉炉中, 由于炉膛中燃烧比较集中, 热负荷分布不均, 工质的热偏差较大, 再加上工质温度较高, 因此水冷壁部件的冷却能力是关键之一。而循环流化床锅炉炉膛内的温度和热流比煤粉炉低得多, 降低了对水冷壁冷却能力的要求; 循环流化床炉膛内的热流密度在炉膛底部最大, 且随着炉膛高度的增加而逐渐减小, 如图 2 所示。所以热流最大值出现在炉膛底部附近, 刚好处于工质温度最低的炉膛下部区域, 有利于水冷壁金属温度的控制, 而对于煤粉炉, 炉膛内热流曲线峰值对应的工质温度较高。

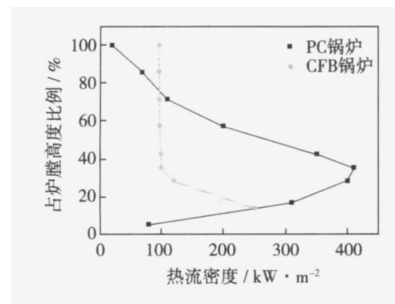


图 2 CFB 锅炉与 PC 锅炉炉内热流密度分布

循环流化床锅炉的低温燃烧使得炉膛内的温度水平低于一般煤灰的灰熔点, 加上炉膛内较高的固体颗粒浓度, 所以水冷壁上基本没有积灰结渣, 保证了水冷壁的吸热能力。与煤粉炉相比, 循环流化床锅炉炉膛内的温度非常均匀, 尤其是宽度和深度方向上的热负荷分布比煤粉炉均匀得多, 因而水冷壁沿宽度和深度方向的吸热也更加均匀。可见, 循环流化床所具有的特性使其更适合与超临界循环相结合。随着循

环流化炉床锅炉技术的日益成熟, 超临界蒸汽循环和循环流化床燃烧技术相结合具有突出的优点^[2]。

超临界循环流化床锅炉兼备了循环流化床燃烧技术和超临界压力蒸汽循环的优点。超临界循环流化床锅炉作为下一代循环流化床燃烧技术, 由于可以得到较高的供电效率, 脱硫成本比烟气脱硫低 50% 以上, 而投资最多与 PC+FGD 持平, 很可能是一种适于在中国大量推广的高效洁净煤发电技术, 其商业前途十分光明。

2.2 超临界 CFB 锅炉主循环回路的构成

国内外不同流派的 CFB 锅炉研制单位, 在物料循环系统的设计技术路线上基本一致。烟气携带的固体物料被旋风分离器收集后, 靠重力流入回料阀。然后一部分流入外置式换热器, 在外置式换热器中被低速流化, 将部分热传给埋管受热面, 受到一定冷却后流入炉膛; 另一部分通过水冷机械调节阀直接流入炉膛。通过调节二者流量比例即可调节炉膛温度。而 Foster Wheeler 公司则采用带有整体式再循环热交换器 (INTREX) 的流化床锅炉方案。

2.3 超临界 CFB 锅炉的变负荷运行

超临界锅炉的设计是以锅炉的运行方式为基础的。在超临界蒸汽参数条件下, 锅炉有两种不同的运行方式: 定压运行和滑压运行。在低负荷运行时, 滑压方式较之定压方式有许多优点, 首先, 在滑压方式下, 蒸汽温度在负荷改变时能够保持恒定, 这使得变负荷时汽轮机内的热应力较小, 而且负荷降低时蒸汽压力水平也相应减小, 因而能够延长汽

轮机的使用寿命。其次, 在低负荷时, 蒸汽压力降低, 比容增大, 使过热器和再热器中的介质分配有所改善。另外, 滑压运行能够减少外部管道和阀门, 简化启动过程, 而且, 滑压运行可以减少电厂能耗, 改善电厂的热效率。

3 国外超临界 CFB 锅炉的研发现状

3.1 STEIN 公司超临界 CFB 锅炉

Stein 公司 600 MW 超临界 CFB 锅炉^[3], 燃烧室截面积为 306 m², 单炉膛双布风板, 6 个冷却式分离器和相应的 6 个冷却式炉墙构成的外置换热器, 如图 3 所示, 采用双布风板结构, 可保证二次风的良好穿透性, 有效降低锅炉灰渣含碳量, 但对两个支腿的床压及风量控制要求较高。锅炉过热蒸汽流量为 483 kg/s, 过热蒸汽压力 27.6 MPa, 过热、再热蒸汽温度均为 602 °C, 再热蒸汽压力为 6 MPa, 给水温度 290 °C。预期 NO_x 的排放小于 150 mg/m³; SO₂ 的排放小于 250 mg/m³。

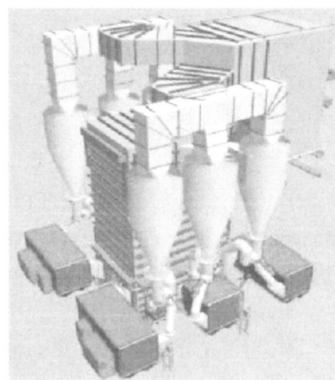


图 3 Stein 公司超临界 CFB 锅炉方案

Stein 对 600 MW 超临界 CFB 锅炉的性能进行了详细的研究, 尤其是燃烧问题, 认为分离器并不是影响循环流率的唯一参数,

煤的破碎粒径对它会有影响: 在 100 μm 范围内, 除了分离器效率之外, 煤的粒径分布以及煤灰、石灰石的成灰特性、磨损特性均对循环流化床有重要影响。由于水冷壁金属管壁温度限制了出口工质温度, 认为内螺纹管可在低质量流速下避免产生传热恶化, 选择合理的水冷壁管直径可以解决这一问题。为承受高达 600 °C 的高温, 过热器和再热器可采用 9%~12%Cr 材料, II 级过热器管考虑使用奥氏体钢, 以满足蠕变、腐蚀、氧化和热疲劳等要求。

3.2 ABB 公司超临界 CFB 锅炉

ABB-CE 公司较早开始了超临界 CFB 锅炉的研究^[2], 如垂直水冷壁超临界下滑压运行特性、炉膛的循环系统和材料问题、滑压运行的超临界 CFB 锅炉的可行性等, 讨论了热流分布、热负荷分配、辅机电耗和启动过程。尽管 CFB 锅炉的燃烧室受热面的局部热负荷仅为煤粉炉的 1/3 以下, 但仍有必要维持一定的质量流速以满足水冷壁的冷却。并完成了 25 MPa/569 °C 的 420 MW 超临界 CFB 锅炉的详细热力性能和水动力计算, 如图 4 所示。

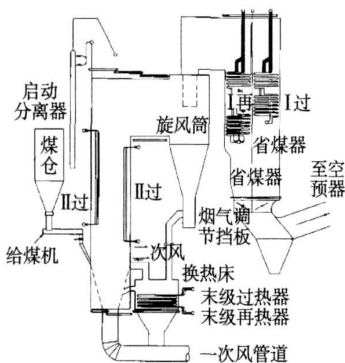


图 4 ABB-CE 公司超临界 CFB 锅炉

ABB-CE 的 CFB 技术是从德国 Lurgi 引进的。固体燃料的循环流动完全采用典型的 Lurgi

系统。烟气携带的固体物料被旋风分离器收集后, 靠重力流入回料阀。通过水冷机械调节阀的分配, 一部分流入换热床, 在床中被低速流化, 将一部分热传给埋在床中的受热管排, 受到一定冷却后流入燃烧室; 其余部分直接返送至燃烧室, 通过调节二者流量调节燃烧室床温度^[1]。

3.3 FW 公司超临界 CFB 锅炉

Foster Wheeler (FW) 所设计的超临界参数的直流锅炉采用本生技术^[3], 方形分离器及其下面的整体式再循环换热器 (INTREX) 紧凑设计, 如图 5 所示。锅炉从 35% 负荷直至 100% 负荷 26.5 MPa 的压力时按线性滑压方式运行, 亚临界向超临界的转折点大约在 75% 负荷, 如图 6 所示。

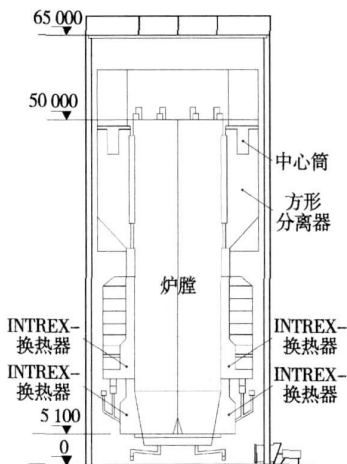


图 5 FW 超临界 CFB 锅炉简图

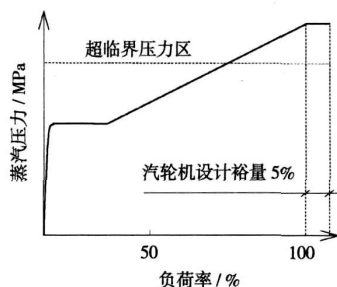


图 6 FW 超临界 CFB 锅炉运行方式

该设计采用两侧各布置 4 个冷却式方形分离器的布置, 再热蒸汽调温主要通过调节进入 INTREX, 灰流量的比例以及尾部双烟道调节挡板的位置来实现。分离器和 INTREX, 均由膜式壁构成, 它与炉膛一体紧凑式布置。工质从四面墙的底部进入炉膛, 然后向上流动至布置在炉膛顶部的出口联箱。炉膛底部水冷壁为光滑管, 以降低流动阻力。中间和上部水冷壁采用内螺纹管, 以防止在低负荷时处于亚临界条件下, 蒸汽质量流量较低产生传热危机。

FW 公司已经获得了一台欧洲的 460 MW 订单, 为波兰 Lagisza 电厂提供世界最大的超临界 CFB 锅炉, 如图 7 所示。该炉采用了 8 个外置式换热器, 4 个为过热器, 4 个为再热器, 锅炉最大连续主蒸汽流量为 359.8 kg/s, 汽轮机入口处蒸汽压力 27.5 MPa, 汽轮机入口处蒸汽温度 560 °C; 再热蒸汽流量 306.9 kg/s, 锅炉进口再热蒸汽压力 5.46 MPa, 再热蒸汽温度 314.3 °C, 汽轮机入口再热蒸汽温度 580 °C。这是世界上第一台超临界 CFB 机组, 正在进行安装, 预计将于 2009 年投产。

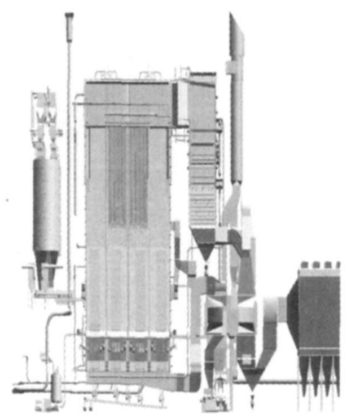


图 7 Lagisza 电厂 460 MW 超临界 CFB 锅炉

4 国内超临界 CFB 锅炉的研发现状

我国是一个 CFB 燃烧技术起步较晚的国家,但由于中国特殊的国情,目前已经成为世界上 CFB 锅炉装机容量最大,燃料范围最广泛的国家,所以在超临界 CFB 锅炉的研发上,具有得天独厚的优势。从我国积累的研究成果来看,开发超临界循环流化床锅炉技术的难度并不是很大。目前,哈锅、东锅和上锅均已针对四川白马项目提出锅炉方案。锅炉参数如表 1 所示。

表 1 锅炉主要参数

	主汽流量 /t·h ⁻¹	再热汽 出口/t·h ⁻¹	主汽出口 /°C	再热汽 出口/°C	再热汽 入口/°C	主汽出口 /MPa	再热汽 入口/MPa
设计值	1 900	1 600	571	569	322	25.4	4.64

4.1 哈尔滨锅炉厂研发的超临界 CFB 锅炉

哈锅与清华大学、国电热工院和西安交通大学等单位合作完成了 600 MW 超临界 CFB 锅炉的方案设计。

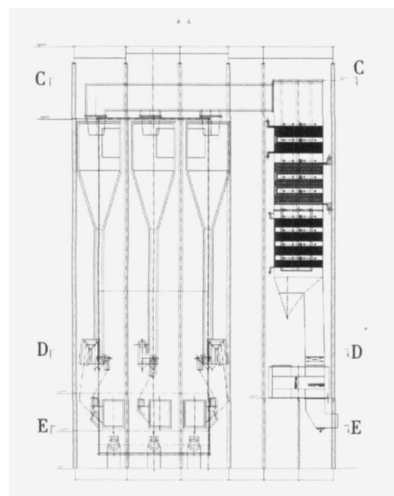


图 8 哈锅超临界 CFB 锅炉

该方案为超临界参数变压运行直流锅炉,一次中间再热 CFB

燃烧,锅炉整体布置如图 8 所示,锅炉热力数据汇总如表 2 所示。

锅炉主要由单炉膛、6 个高效绝热旋风分离器、6 个回料阀、6 个外置式换热器、尾部对流烟道、8 台滚筒冷渣器和 2 台回转式空预器等部分组成。采用裤衩腿、双布风板结构,炉膛断面为 16.952 m×25.376 m,炉膛高度为 56 m,炉膛内蒸发受热面采用垂直管圈一次上升膜式水冷壁结构。水冷布风板,大直径钟罩式风帽,炉膛内布置有中隔墙水冷壁和低温屏式过热器。在炉膛上部左右两侧各布置有 3 个内径为

9.3m 的高效绝热旋风分离器。每个分离器回料腿下布置一个回料阀和一个外置式换热器,外置换热器入口设有锥型阀,通过调整锥型阀的开度来控制外置换热器和回料阀的循环物料分配,循环物料分别以高温物料和低温物料的状态返回炉膛,从而实现了

调节再热蒸汽温度;中间的 2 个外置换热器中布置低温过热器,靠近炉后的 2 个外置式换热器内布置中温过热器,布置过热器的 4 个外置床的主要作用是用来调节床温。

尾部对流烟道中依次布置高温过热器、低温再热器和省煤器,最后进入回转式空气预热器。过热蒸汽温度由煤水比调节,并配合布置在各级过热器之间的三级喷水减温器作为细调。再热汽温通过布置有高温再热器的 2 个外置式换热器来调节,同时还在低温再热器入口和高温再热器中间布置有事故喷水减温器。

锅炉启动采用带泵启动系统,4 只内置式分离器布置在炉膛前侧,水冷壁出口产生的全部工质通过排汽管引入分离器内,在锅炉负荷小于 30%B-MCR,直流负荷时,分离器起汽水分离作用,分离器出口蒸汽进入尾部包墙过热器,水则通过连接管进入贮水箱,再由水连通管排入循环泵,作为再循环工质与给水混合后进入省煤器系统。

锅炉启动采用床上启动燃烧器和床下启动燃烧器结合的启动

表 2 哈锅超临界 CFB 锅炉热力计算表(B-MCR 工况)

	水冷壁	高温 过热器	中温 过热器	低温 过热器	低温 再热器	高温 再热器	省煤器	空预器
出口烟(灰)温/°C	900	683	543	534	480	628	334	125
工质进口温度/°C	334	477	456	420	320	474	290	20
工质出口温度/°C	420	571	490	464	474	569	334	287
平均烟速/m·s ⁻¹	5.2	11.5	—	—	11.7	11.75	8.7	—

床温调节和再热汽温调节的目的。回料阀为气力式自平衡型,流化风用高压风机供给。在炉膛两侧下部对称布置 6 个外置式换热器,靠近炉前的 2 个外置式换热器内布置高温再热器,这 2 个外置式换热器的主要作用是用来

方式,以节省启动用油。床下布置有 6 只启动燃烧器(热烟发生器),床上布置 16 只启动燃烧器。

4.2 东方锅炉厂研发的超临界 CFB 锅炉

东锅的超临界 CFB 锅炉为超临界直流炉^[6],双炉膛, H

型布置, 平衡通风, 一次中间再热, 采用外置式换热器调节床温及再热汽温, 高温汽冷旋风分离器, 锅炉整体成左右对称布置, 支吊在锅炉钢架上, 锅炉总图如图 9 所示, 热力计算如表 3 所示。

表 3 东锅超临界 CFB 锅炉热力计算表(B-MCR 工况)

	水冷壁	末级 过热器	二级 过热器	一级 过热器	冷段 再热器	热段 再热器	省煤器	空预器
出口烟(灰)温/℃	875	655	616	599	501	701	334	123
工质进口温度/℃	336	510	481	438	320	486	290	20
工质出口温度/℃	417	571	527	490	486	569	334	286
平均烟速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5.14	—	—	—	—	—	—	—

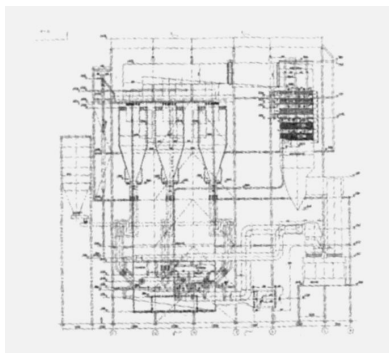


图 9 东锅超临界 CFB 锅炉

锅炉由三部分组成, 第一部分布置有主循环回路, 包括炉膛(17.64 m×25.11 m×55 m)、汽冷分离器(φ8.5 m)、回料阀、外置式换热器及冷渣器等; 第二部分为尾部对流烟道, 烟道内布置有低温再热器、低温过热器和省煤器; 第三部分为单独布置的回转式空气预热器。

锅炉的循环系统由启动分离

器、贮水灌、下降管、下水连接管、水冷壁上升管及汽水连接管等组成。在负荷 $\geq 35\%$ THA 后, 直流运行。一次上升, 启动分离器入口具有一定的过热度。为避免炉膛内高浓度灰的磨损, 水冷壁采

用全焊接的垂直上升膜式管屏, 下炉膛采用优化的内螺纹管, 上炉膛采用光管, 上下炉膛之间由过渡集箱提供下炉膛内螺纹管和上炉膛光管的过渡, 保证炉膛上下压力均衡, 减小不平衡。

炉膛底部采用裤衩型将下炉膛一分为二, 布风板下方为由水冷壁管弯制围成的水冷等压风室。燃料从布置在 6 个回料器上的给煤口送入炉膛。石灰石采用气力输送, 6 个石灰石给料口布置在回料腿上。

锅炉设置 4 个床下点火风道并配有床上助燃油枪, 用于锅炉启动和低负荷稳燃, 8 台滚筒冷渣器被分为两组布置在炉膛两侧。

6 台汽冷分离器布置在炉膛两侧的钢架副跨内, 每个旋风分离器下布置一个回料器。由旋风

分离器分离下来的物料一部分经回料器直接返回炉膛; 另一部分则经过布置在炉膛两侧的外置换热器后再返回炉膛。靠近炉后的 2 个外置床内布置中温过热器, 通过调节其间的灰流量来控制床温; 靠近炉前的 2 个外置床内布置高温再热器, 通过调节其间的灰流量控制再热器出口温度; 中间的 2 个外置床内布置高温过热器, 作为喷水调温的辅助手段, 通过调节其间的灰流量控制过热器出口汽温。

4.3 上海锅炉厂研发的超临界 CFB 锅炉

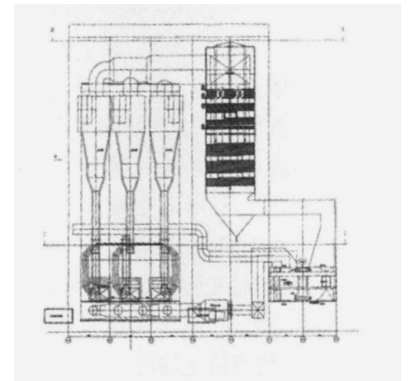


图 10 上锅超临界 CFB 锅炉

上海锅炉厂与中国科学院工程热物理研究所联合开发了 600 MW 超临界 CFB 锅炉产品^[4], 锅炉总体布置如图 10 所示, 锅炉热力计算汇总表如表 4 所示, 锅炉采用全膜式壁结构, 炉膛下部为单布风板, 炉底采用水冷一次风室结构, 炉膛上部布置 32 片扩展蒸发受热面, 炉膛宽为 14.64 m, 深为 30.656 m, 高为 56.2 m。炉膛由 $\phi 32 \times 7.5$ 膜式水冷壁组成, 炉膛下集箱标高为 4 m。采用内嵌逆流柱型风帽和水冷布风板等压风室, 12 个给煤点沿炉膛宽度方向均匀分布在两侧墙。在主循环回路上, 6 个并联的大型高效绝热旋风分离器下分别对应 6 台

表 4 上锅超临界 CFB 锅炉热力计算表(B-MCR 工况)

	水冷壁	末级 过热器	二级 过热器	一级 过热器	冷段 再热器	热段 再热器	省煤器	空预器
出口烟(灰)温/℃	890	687	632	603	462	701	321	130
工质进口温度/℃	331	496	453	424	310	474	282	40
工质出口温度/℃	422	571	505	468	479	569	324	257
平均烟速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5.2	—	—	—	—	—	—	—

返料器、6台外置式换热器及4台滚筒冷渣器,排渣温度控制在150℃以下,炉后布置一台四分仓容克式空气预热器,以上设备均通过钢结构支撑。后烟井深度为19.1m,宽度为13.8m,后烟井内依次布置有高温过热器、低温再热器和二级省煤器,二级省煤器之下布置有由护板包围的4组一级省煤器。

燃料通过输送皮带送至布置在炉膛四面的12只给煤口。锅炉设置有12只床上点火油枪和4只床下点火油枪,床下点火燃烧器为主启动燃烧器,床上启动燃烧器起助燃作用。床下油枪所需助燃空气为一次风,床上油枪所需助燃空气为二次风。锅炉采用6个直径为9.2m的蜗壳式高温绝热旋风分离器,分别布置在炉膛两侧。采用非机械式的U型自平衡返料器,料位具有自平衡能力,同时又防止烟气反窜,返料风由专门的高压流化风机提供,保证物料稳定输送^[4]。

4.4 国内超临界CFB锅炉方案分析比较

在具有亚临界300MW等级及以下CFB锅炉成功运行经验的基础上,结合超临界煤粉炉的设计经验,国内三大锅炉制造企业提出的超临界CFB锅炉方案各具特点,分析比较如下:

(1)水动力问题是超临界CFB锅炉研制的关键,目前三家锅炉厂均已完成垂直上升型水冷壁的水动力特性及传热特性的设计及变工况水动力学性能计算预测,由于CFB锅炉炉膛内温度分布的均匀性及超临界煤粉炉成功的设计运行经验,尽管三家锅

炉厂的水动力方案不同,但均认为是成熟可靠的;

(2)哈锅和东锅都采用裤叉腿单炉膛、双布风板结构,而上锅采用单布风板结构,从二次风穿透角度看,双布风板结构优于单布风板,因为炉膛中间送风可有效保证燃料的燃尽,降低未燃尽碳损失,提高锅炉效率,但从锅炉的运行控制角度,双布风板对运行控制要求较高,可能导致翻床现象,在炉膛结构的选择上应综合考虑如上两个因素;

(3)哈锅和上锅采用高温绝热旋风分离器,东锅采用汽冷分离器,分离器受热面内介质为过热蒸汽,两种分离器形式均是经运行实践证明的成熟技术;

(4)哈锅将低温过热器布置为炉内屏式受热面安全性可靠,东锅将末级过热器作为屏式受热面布置在炉内,在受热面的布置上需充分考虑流量偏差及运行中有可能出现的烟气侧偏差,受热面材质的材料等级需选择较高才能保证受热面的安全运行,上锅炉内不布置辐射受热面,在外置式换热器中布置有过热器和再热器受热面,外置床的尺寸会偏大些。

5 结 论

超临界CFB锅炉技术是CFB锅炉发展的合理选择,国内科研院校和锅炉制造厂已针对超临界CFB锅炉的研发开展了大量的工作,自主研发600MW等级超临界CFB锅炉已经没有了颠覆性技术障碍,建设试验工程的条件基

本成熟,但在超临界CFB锅炉的设计过程中仍需认真考虑如下问题:

(1)超临界600MW等级CFB锅炉的炉膛高度为56m左右,炉膛上部的物料浓度将低于小容量等级的CFB锅炉,炉膛水冷壁的传热系数如何选取成为关键问题;

(2)垂直蒸发管在CFB燃烧室条件下的动态特性及变工况水动力学性能计算预测;

(3)由于外置床内布置有大量的过热器和再热器受热面,埋管受热面的工作条件较为恶劣,受热面的热偏差计算对锅炉的安全稳定运行显得尤为重要;

(4)超临界600MW等级CFB锅炉炉膛断面已达到400m²以上,二次风穿透及燃烧室宽度设计是保证燃料燃尽和提高锅炉效率的关键。

参考文献:

- [1] 吕俊复,岳光溪,张建胜,等.超临界循环流化床锅炉的可行性[J].锅炉制造,2002,4:2-3.
- [2] 吕俊复.超临界CFB锅炉水冷壁热负荷及水动力研究[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [3] 刘 昫,刘德昌.阿尔斯通CFB锅炉的大型化发展[J].电力设备,2006,12:18-19.
- [4] 吕清刚,宋国良,高子瑜,等.自主研发600MW超临界CFB锅炉技术[R].北京:清华大学,2007.
- [5] 尹 刚,卢啸风,刘汉周,等.超临界CFB锅炉的发展趋势与技术特点探讨[J].电站系统工程,2007(2):9-10.
- [6] 聂 立.东方自主开发600MW超临界循环流化床锅炉方案设计说明书[R].成都:东方锅炉(集团)股份有限公司,2008.

(编辑 何静芳)

超临界循环流化床锅炉技术特点比较 = **A Comparison of Technical Features of Supercritical Circulating Fluidized Bed Boilers** [刊, 汉] / ZHANG Man, BIE Ru-shan (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), WANG Feng-jun, JIANG Xiao-guo (Harbin Boiler Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 271 ~ 276

To summarize the technical features of supercritical CFB (circulating fluidized bed) boilers, analyzed were the parameter selection for supercritical boilers and the reasons why CFB boilers are more suitable than pulverized coal boilers for adopting supercritical parameters. The status quo of the study on supercritical CFB boilers both at home and abroad was described in detail. An analysis and comparison of the versions of a supercritical 600 MW CFB boiler for Baima Project proposed by three domestic boiler manufacturers shows that there exists no overriding technical barrier in the design of a supercritical CFB boiler. Moreover, the supercritical CFB combustion technology will become an important clean coal-based power generation technology for coal-fired power plants in China. However, with the in-depth development of research on supercritical CFB boilers, some relevant problems still merit further study and investigation. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, supercritical, water wall, technical feature

圆形截面离心压缩机蜗壳内部三维流动的测量与分析 = **Measurement and Analysis of Three-dimensional Flows in the Volute of a Centrifugal Compressor with a Round Section** [刊, 汉] / GAO Li-min, WANG Huan, LIU Bo (Key Laboratory on Airfoil and Cascade Aerodynamics, College of Power and Energy Source, Northwest Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072), WANG Shang-jin (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 277 ~ 280

By utilizing a five-hole probe, measured in detail were three-dimensional flows in the volute of a large-sized low-speed centrifugal compressor with a round section. As a result, a flow velocity distribution and a distribution chart of flow speed, total and static pressure along the radial and circumferential direction in the radial measurement section of the spiral flow passage portion of the volute were given, and the flow rates thus obtained, compared with those obtained from the one-dimensional calculation. It has been found that the measured flow rates in various sections assume an identical variation tendency with those obtained from the one-dimensional calculation. In step with increasing angles, the difference between the calculation results and test ones gradually decreases. In addition, the flows in the volute under test pertain to complex three-dimensional flows, and the flow speed distribution along the radial direction in various radial sections of the volute features a comparatively conspicuous difference from the momentum conservation law. The change in total pressures along the circumferential direction is not manifest. **Key words:** centrifugal compressor, volute, round section, flow measurement

悬臂转子系统振动特性分析 = **An Analysis of the Vibration Characteristics of a Cantilever Rotor System** [刊, 汉] / AN Xue-li, ZHOU Jian-zhong, LI Chao-shun, LIU Li (College of Hydropower and Digital Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 281 ~ 285

Derived and established was a kinetic equation for cantilever rotor systems with the role of rotor blades being taken into account. Through a numerical integration of the motion differential equation, the influence of various factors on the vibration characteristics of a cantilever rotor system was analyzed. The factors include mass eccentricity, rotor blade mass and bearing spacing etc. The numerical analytic results show that with a continuous increase of the mass eccentricity of wheel disk No. 2, the radial displacement of the rotor system will exhibit an approximately linear increase. In case different values are chosen for rotor blade mass and the spacing between bearings etc., the change of the radial displacement of the rotor system becomes relatively complicated. The radial displacement value of wheel disk No. 1 may be greater than, equivalent to or less than that of wheel disk No. 2. **Key words:** overhung rotor, blade quality, mass eccentricity, radial displacement, bearing spacing

叶片的周向前弯角度对低压轴流风扇叶顶泄漏流场的影响 = **Influence of the Circumferential Forward Skew**