

国产 660 MW 超超临界燃煤锅炉特性分析及性能试验研究

宁新宇¹ 岳峻峰² 梁绍华¹ 张恩先¹

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 211103)

摘 要: 针对已投运的上海锅炉厂自主设计制造的首台 660 MW 超超临界燃煤锅炉进行了相关性能试验。试验结果表明, 投产后锅炉运行状况基本良好, 但再热器汽温存在偏差, 通过调整运行磨组、二次风配风方式, 并将水平偏置二次风开度放置在 40%, 可有效减小再热器汽温偏差, 同时保证较高的锅炉热效率; 锅炉在满负荷运行时, 较佳的运行氧量在 2.8~2.9 范围; 在通过调节 SOFA 风量降低 NO_x 时, 需保持 5 层 SOFA 风中下 3 层全开。最后, 验收试验结果显示, 锅炉各项主要性能参数均达到或优于设计值。

关 键 词: 超超临界锅炉; 再热器汽温偏差; 配风方式; CFS(同轴燃烧系统)

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

引 言

我国从 1992 年在上海石洞口建成国内首座超临界压力发电机组以来, 超临界技术作为一种较为成熟的洁净煤燃烧技术, 以其容量大、参数高、能耗低、可靠性高和环境污染小等特点而倍受关注, 此技术也是解决我国当前能源利用率低和环境污染严重等问题较为现实有效的重要途径之一^[1-3]。到目前为止, 已有较多超临界与超超临界机组投入商业运行^[4-6]。在本研究中, 以某厂投运的上海锅炉厂自行设计制造的首台 660 MW 超超临界变压运行直流锅炉为对象, 就机组的安全、稳定与经济性运行进行了相关试验, 所得试验结果可为其它超超临界机组的运行及设计提供相关技术参考。

1 试验设备

该锅炉为 660 MW 超超临界参数变压运行 π 型直流炉, 采用定—滑—定运行方式, 单炉膛、四角切

向燃烧、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构, 主要设计参数如表 1 所示。制粉系统采用中速磨煤机直吹式制粉系统, 每炉配 6 台 HP1043 型磨煤机(5 台运行, 1 台备用), 煤粉细度按 200 目筛通过量为 75%, 设计煤种为淮南煤, 校核煤种为淮北煤, 具体参如表 2 所示。

表 1 锅炉主要设计参数

	BMCR	BRL
主蒸汽流量 / t · h ⁻¹	2 024	1 928
主蒸汽温度 / °C	605	605
主蒸汽压力 / MPa	26.15	26.0
再热器进口温度 / °C	377	375
再热器出口压力 / MPa	6.0	5.69
再热器出口温度 / °C	603	603
给水温度 / °C	298	294
计算热效率 (按低位发热量) / %	93.57	93.60
保证热效率 (按低位发热量) / %	93.60	—
燃料消耗量 / kg · h ⁻¹	267.8	257.7

燃烧器系统采用 LNCFS 系统(低 NO_x 同轴燃烧系统), 其主要组件包括紧凑燃尽风、可水平摆动的分离燃尽风、预置水平偏角的辅助风喷嘴以及强化煤粉着火的煤粉喷嘴, 采用常规的二级点火和微油点火方式, 采用此燃烧系统以使 NO_x 排放浓度达到或低于 300 mg/m³, 燃烧器具体结构如图 1 所示; 此外, 改进了水冷壁的类型, 与常规 600 MW 超临界锅炉水冷壁的类型相比, 增大了螺旋管的螺旋角度及螺旋管和垂直管的比例, 有利降低锅炉的一次汽阻

收稿日期: 2010-05-13; 修订日期: 2010-06-29

作者简介: 宁新宇(1981-) 男, 江苏南京人, 江苏方天电力技术有限公司工程师。

力,提高机组的安全性和经济性;在再热器调温方式方面,采用尾部烟气挡板代替常规的燃烧器摆动;另外,还在尾部烟道采用了有效的防振技术,同时也对过热器和再热器的结构进行了优化处理。

表 2 煤种特性

	设计煤种	校核煤种
煤种	烟煤	烟煤
收到基碳 $C_{ar}/\%$	54.73	53.35
收到基氢 $H_{ar}/\%$	3.74	3.47
收到基氧 $O_{ar}/\%$	7.12	6.84
收到基氮 $N_{ar}/\%$	1.04	0.96
收到基全硫 $S_{t,ar}/\%$	0.37	0.21
全水分 $M_t/\%$	7.0	8.5
空气干燥基水分 $M_{ad}/\%$	1.55	1.79
收到基灰分 $A_{ar}/\%$	26.0	26.67
干燥无灰挥发分 $V_{daf}/\%$	42.5	35.57
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/MJ \cdot kg^{-1}$	21.30	20.74

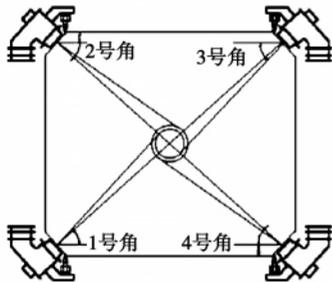


图 1 燃烧器结构布置

2 试验结果与分析

针对锅炉的设计特点,安排进行了优化调整试验。在优化调整试验前,先进行了习惯运行工况试验,在此基础上进行了磨煤机优化试验、变磨煤机组合、变运行氧量试验、变二次风配风试验、变 CFS 风风门开度试验与变 SOFA 风(分离燃尽风)风门开度试验等,最后进行了相关验收试验。

2.1 习惯运行工况试验

习惯运行工况试验数据如表 3 所示。从表中可以看出,机组的热效率超过了设计值 93.60%,主蒸汽参数在设计值范围内,但机组还是存在如下问题:(1) 低温再热蒸汽前汽温 A/B 侧存在较大偏差,约达 22 °C;(2) 再热器出口蒸汽温度偏低;(3) 省煤

器出口氧量偏高。对于低温再热器前汽温 A/B 侧存在偏差,主要是由于炉膛出口的“旋转残余”造成的,而再热出口蒸汽温度偏低与二次风配风方式及相关因素有关。针对上述情况,进行了如下几个方面的试验。

表 3 习惯运行工况试验数据

	数据
电负荷/MW	660
省煤器出口实测氧量(A/B)/%	3.90/3.30
过热蒸汽温度(A/B)/°C	599.9/600.2
再热蒸汽温度(A/B)/°C	587.4/590.5
低温再热器减温前汽温(A/B)/°C	519.4/497.6
实测排烟温度(A/B)/°C	132.6/132.2
飞灰可燃物含量(A/B)/%	1.19/1.13
排烟热损失/%	4.64
化学不完全燃烧热损失/%	0.01
机械未完全燃烧热损失/%	0.43
修正后锅炉热效率/%	94.23

2.2 磨煤机优化试验

各磨煤机细度检测试验结果表明,除 E 磨煤机的煤粉细度偏粗外,其它各管细度均较好,通过调整 E 磨煤机分离器折向挡板开度,使其煤粉细度 R_{90} 降低到 20% 以下,基本满足锅炉的燃烧,具体如图 2 所示。

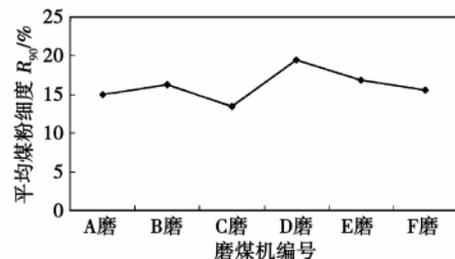


图 2 各磨煤机调整后煤粉细度

根据系统的运行状况,选取主力运行磨煤机 B 磨进行变一次风量试验,以得到磨煤机运行合理的风煤比。试验结果显示,当表盘显示一次风量从 138.4 t/h 下降到 129.5 t/h 时,平均煤粉细度 R_{90} 从 16.30% 降到 15.66%,但变化不大。当继续下降一次风量到 120 t/h 时,B 磨煤机运行出现波动。因此,从安全性和经济性方面考虑,B 磨煤机入口一次风量应保持在 125 ~ 130 t/h,并据此对其它磨煤机进行了相应调整,通过调整,两侧一次风机电流与调整前相比较,在相同负荷和煤质条件下降低了约 11

A,这有利于降低厂用电率,同时调整后飞灰与炉渣含碳量都有所降低,NO_x排放浓度也稍有降低,具体如表4所示。

表4 变一次风量前后试验数据

	飞灰/炉渣含碳量	NO _x 排放浓度/mg·m ⁻³
调整前	1.15/2.21	285
调整后	0.64/0.88	279

2.3 变磨煤机组合试验

针对再热器出口蒸汽温度偏低的状态,先进行了变磨煤机组合试验。在试验中,采用的磨组分别为ABCDE和BCDEF组合,负荷为660 MW,省煤器氧量平均值分别为3.60%和3.80%,修正后锅炉热效率分别为94.26%和94.16%,NO_x排放浓度分别为194和285 mg/m³。

试验结果显示,ABCDE(分别代表一台磨煤机)磨组合的锅炉热效率稍高于BCDEF磨组合,同时后者的NO_x排放浓度要比前者高91 mg/m³,这是由于采用上五磨运行时,燃烧器区域中的还原性氛围区域变窄,使烟气在还原性区域的停留时间相对变短,影响了氮的还原^[7];另外,在采用下五磨运行时再热汽温偏低,即使将燃烧器向上摆动到较高位置,再热器温度还是偏低,这一方面与尾部烟气挡板的调节范围设置偏小有关,另一方面可能与受热面的设计有关;同时低温再热器减温前的汽温偏差也显示前者较后者大,这需要在气温偏高侧投入大量减温水,以减小气温偏差,这一方面影响整个机组的热效率,另一方面对锅炉的安全操作也颇为不利^[8-9]。综合考虑,在机组负荷为660 MW时,从整个机组热效率和安全操作来考虑,宜采用上五磨运行。

2.4 变省煤器出口氧量试验

锅炉运行氧量的大小对锅炉运行性能影响很大,需要寻找使总热损失最小的运行氧量。但在考虑效率的同时,还应考虑炉膛内壁面还原性气氛,以防止或减弱高温腐蚀的发生^[10];另外,辅机电耗也是机组运行氧量的考虑因素。变氧量试验分为3个工况,试验负荷为660 MW,省煤器出口氧量两侧平均值分别为3.8%、3.2%和2.7%。试验结果表明,当氧量从3.8%下降到2.7%时,锅炉热效率呈上升趋势,其原因主要是由于 q_2 的明显减小, q_4 随着氧量的降低虽稍有变化,但其总体上较小,这是试验煤质与设计煤质较为接近,适合炉膛燃烧的缘故;3个工况NO_x排放浓度随氧量增大呈上升趋势,如图3~图4所示。 q_2 排烟热损失; q_3 化学未完全燃烧热损

失; q_4 机械不完全燃烧热损失。根据上述分析结果,并考虑到燃烧器结构中CFS风(相关内容见下述)的存在,在660 MW负荷下,机组运行氧量宜控制在2.8%~2.9%左右。

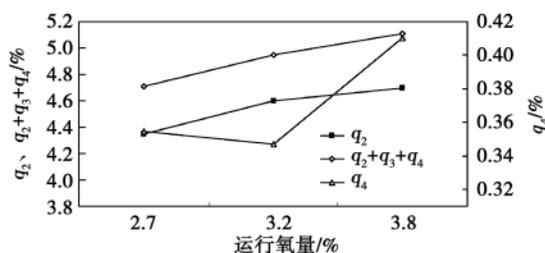
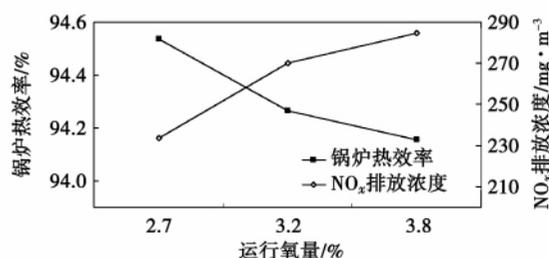


图3 氧量对各项热损失的影响

图4 氧量对锅炉热效率及NO_x排放浓度的影响

2.5 变二次风配风试验

在变氧量试验工况基础上,安排进行了变二次风配风试验。试验工况为3个,省煤器出口氧量均为2.9%左右,采用的二次风配风方式分别为束腰配风、正塔配风、均布配风,其具体配风方式如表5所示。在保持其它运行参数基本一致的条件下,锅炉热效率以均布配风时最高,束腰与正塔基本相当;NO_x排放浓度以均布时最小,束腰时最大;低温再热器减温前汽温偏差以均布配风时最小,如图5~图7所示。因此,不管从锅炉热效率、NO_x排放浓度还是从对低温再热器减温前汽温偏差的影响来看,均布配风均为最优。

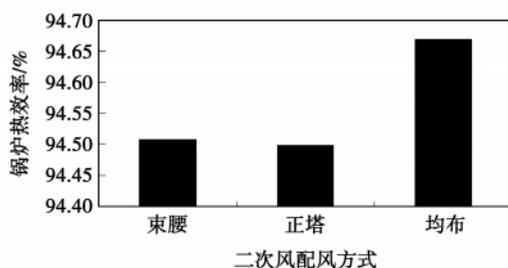


图5 二次风配风方式对锅炉热效率的影响

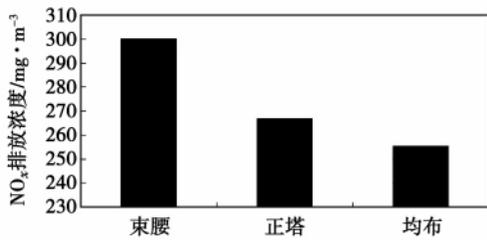


图 6 二次风配风方式对 NO_x 排放浓度的影响

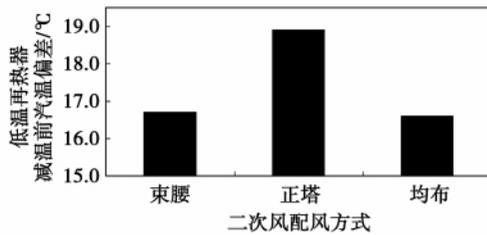


图 7 二次风配风对低温再热器减温前汽温偏差的影响

表 5 各试验工况的二次风配风方式

配风方式	AA	AB	BC	CD	DE	EF
束腰 / %	50	80	50	20	50	70
正塔 / %	50	80	70	60	50	30
均布 / %	100	50	50	50	50	50

注: AA 为底层二次风; AB 为 A 层和 B 层燃烧器之间的二次风, 以此类推。

2.6 变 CFS 风风门开度试验

预置水平偏角辅助风的作用是一方面为一次风中煤粉继续燃烧补充所需空气, 并起扰动、混合作用; 另一方面, 通过预置水平偏角, 有利于炉膛形成风包火的燃烧状况, 这样有利于防止炉膛壁面粘污、结焦, 以及壁面的高温腐蚀。在改变锅炉 CFS 风门开度调整试验中, 共进行了 3 次试验, 其中 CFS 风门开度分别为 30%、40%、50%。从试验结果来看, CFS 风门开度为 40% 时锅炉热效率最高, 30% 居其次, 50% 时最小; 对于 NO_x 排放浓度则是 40% 时最低, 30% 居其次, 50% 时最高, 如图 8 所示; 对于低温再热器减温前汽温偏差的影响, 随着 CFS 风门开度的增大, A/B 侧温差减小, 与习惯试验工况相比, 降低了约 10 °C, 如图 9 所示, 其原因是 CFS 风门开度增大, 使 CFS 风的动量增大, 刚性增强, 对下游一次风的扰动增强, 导致切圆增大, 进而使烟气与炉膛壁面的摩擦增强, 由于炉内烟气向炉膛顶部的上升的

过程中动量会衰减^[11], 在炉膛高度足够高的情况下, 烟气上升到炉膛上部后, 动量衰减的更大, 减小了烟气进入水平烟道时的“旋转余旋”, 进而改善汽温偏差^[10], 因此调整 CFS 风风门开度可影响切圆的大小。综合考虑锅炉热效率、NO_x 排放浓度和再热器的汽温偏差, 宜将 CFS 风门放置在 40% 左右。

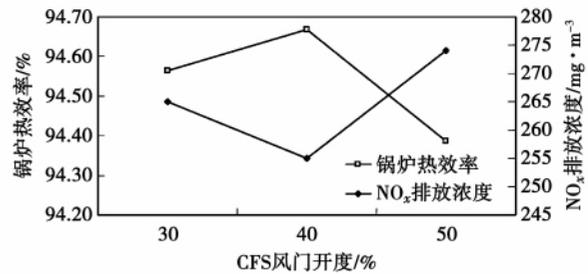


图 8 CFS 风门开度对锅炉热效率与 NO_x 排放浓度的影响

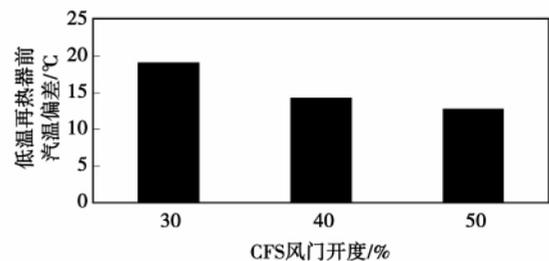


图 9 CFS 风门开度对低温再热器 A/B 侧温差的影响

2.7 变 SOFA 风门开度试验

在此锅炉燃烧器 LNCFS 系统中, 共布置了 5 层 SOFA 风, SOFA 采取角式布置, 上下摆角为 30°, 水平摆角为 15°。在变 SOFA 风量试验中, 共进行了 4 个试验工况分别为 T₁ ~ T₄, 在这 4 个试验中, 负荷均为满负荷。在保持煤种和其它运行参数基本一致的情况下, 调整 SOFA 风风门开度, 测量 NO_x 排放浓度与风门开度的关系, 其 SOFA 风风门如表 6 所示。试验结果显示, 随着 SOFA 风风门总开度的增大, NO_x 排放浓度呈降低趋势, 飞灰含碳量呈增大趋势, 与相关文献的结果一致^[7], 但是工况 T₃ 与工况 T₄ 相比较, NO_x 排放浓度变化较小, 具体如图 10 所示。因此对于满负荷运行状况, SOFA 风风门保持下 3 层全开即可。对于本燃烧器 LNCFS 系统, 布置 5 层 SOFA 风, 这有利于灵活设置各层风门开度, 提高了机组对煤种的适应性。

表 6 各层 SOFA 风门开度 (%)

工况	I	II	III	IV	V
T_1	60	50	50	0	0
T_2	100	100	50	0	0
T_3	100	100	100	20	0
T_4	100	100	100	100	50

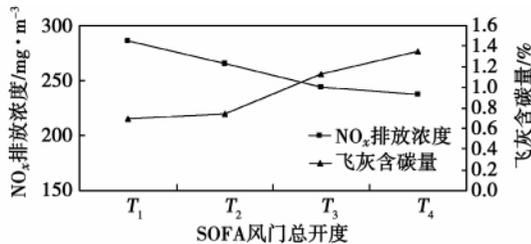


图 10 SOFA 风门开度对 NO_x 排放浓度与飞灰含碳量影响

2.8 验收试验

在通过一系列优化调整试验后,对该机组进行了相关验收试验。

在额定出力试验中,其出力能达到 1 928 t/h,且能安全稳定的连续运行,同时在额定出力下的两次平行试验工况中,修正后锅炉热效率分别为 94.36%、94.53%,达到设计值不小于 93.6% 的要求,同时 NO_x 排放浓度分别为 248 和 243 mg/m^3 ,达到设计值不大于 300 mg/m^3 要求。

在最大出力试验中,其出力达到 2 027.5 t/h,达到设计出力 2 024 t/h,负荷达到 702.7 MW,此时主再热蒸汽温度均达到设计值,但主蒸汽压力低于设计值,其原因是受发电机出力制约造成的,同时机组的一次汽阻力和二次汽阻力基本在设计范围内。

表 7 试验期间燃烧器区域温度

测点高度/m	1 号角/ $^{\circ}\text{C}$	2 号角/ $^{\circ}\text{C}$	3 号角/ $^{\circ}\text{C}$	4 号角/ $^{\circ}\text{C}$
24.4	1029	1066	1090	1068
30.0	1141	1099	1100	1129
33.2	1070	1146	1126	1098
36.5	1106	1081	1067	1126
39.5	1029	1019	1070	1034
42.0	927	972	959	979
58.5	694	—	—	744

在断油低负荷试验中,其出力为 589.4 t/h,达到设计值不大于 30% BMCR(最大连续出力)(672 t/h)的要求,在试验期间对炉膛温度进行了测量,测

量结果如图 7 所示,炉膛温度基本正常,燃烧稳定;同时,对试验期间炉膛负压进行了测量与记录,试验结果显示,试验期间炉膛负压基本保持在 -50 Pa 左右,运行状况良好。

从上述试验结果来分析,该锅炉性能优良,各主要指标均达到或优于设计值。

4 结 论

(1) 机组在满负荷下运行时,运行氧量宜控制在 2.8% ~ 2.9% 左右;

(2) 为改善再热器汽温偏差,机组宜采用上五磨运行,同时机组燃烧系统(LNCFS)采用均布配风方式,并合理调节 CFS 风门开度可有效调整再热器汽温偏差,对于本机组,CFS 开度放置在 40% 左右较合适;

(3) 在满负荷下,为较好控制 NO_x 排放浓度,同时保证飞灰含碳量在较低水平,宜将下三层 SOFA 风门保持全开。

(4) 锅炉性能优良,各主要性能参数均达到或优于设计值。

参考文献:

- [1] 姚丹花,徐雷元.上海锅炉厂有限公司超(超)临界锅炉主要技术特点[J].锅炉技术,2009,40(4):1-7.
- [2] 肖汉才,周臻.超临界机组与超超临界机组的优势及在我国大力发展的广阔前景[J].电站系统工程,2004,20(5):8-10.
- [3] 陈瑞雨,施鸿飞,董厚枕.超超临界压力锅炉的设计探讨[J].动力工程,2002,22(4):1833-1840.
- [4] 徐通模,袁益超,陈干锦.超大容量超超临界锅炉的发展趋势[J].动力工程,2003,23(3):2363-2369.
- [5] 樊泉桂.超临界锅炉的气温特性及控制[J].动力工程,2007,27(1):34-37.
- [6] 王振雷,李奕.哈锅 1 000 MW 超超临界锅炉技术特点简介[J].电站系统工程,2006,22(5):41-42.
- [7] 高小涛.大型燃煤电站锅炉低 NO_x 燃烧及其排放特性的研究[D].南京:东南大学,2009.
- [8] HUANG QILI,ZHANG YONGXING. Study on matching performance of Yuanbaoshan NO. 2 boiler steam & water system[J]. International Conference on Power Engineering,1997:207-211.
- [9] 杨熙.锅炉再热减温水量过大的危害及原因分析[J].热力发电,2006(3):63-64.
- [10] 岑可法,周昊,池作和.大型电站锅炉安全及优化运行技术[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [11] 陈刚,郝楚光.锅炉炉膛上部容积热负荷与煤粉锅炉烟温偏差的关系[J].中国电机工程学报,2002,22(11):146-148.

(陈滨 编辑)

国产 660 MW 超超临界燃煤锅炉特性分析及性能试验研究 = **Analysis of the Characteristics of a Domestically-made 660 MW Ultra-supercritical Coal-fired Boiler and Experimental Study of Its Performance** [刊, 汉] NING Xin-yu, LIANG Shao-hua, ZHANG En-xian (Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co. Ltd. Nanjing, China, Post Code: 211102), YUE Jun-feng (Jiangsu Provincial Electric Power Experiment Research Institute Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 211103) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 415 ~ 419

Relevant performance tests were conducted of a first 660 MW ultrasupercritical coal-fired boiler, which was put into operation in a power plant and independently designed and manufactured by Shanghai Boiler Works. The test results show that after it has been put into operation, its operation conditions were basically good. However, there exists a deviation in the temperature of steam in the reheater. By adjusting the ball mill group in operation and the overfire air distribution mode, and properly setting the opening of the horizontally-offset overfire air dampers at 40%, the foregoing deviation was effectively reduced and in the meantime, a relatively high thermal efficiency of the boiler was guaranteed. In case of the boiler operating at the full load, the relatively good oxygen quantity for operation fell in a range from 2.8% to 2.9%. When NO_x was reduced by adjusting the SOFA (separated overfire air) quantity, the lower three levels of the total five levels of SOFA were necessarily kept being fully opened. Finally, the results of the acceptance test show that all the main performance parameters of the boiler reached or were better than the design values. **Key words:** ultra-supercritical boiler, reheater steam temperature deviation, air distribution mode, CFS (concentric firing system), acceptance test

混流式流化床冷渣器返料特性的试验研究 = **Experimental Study of the Material Return Characteristics of a Mixed-flow Type Fluidized Bed Slag Cooler** [刊, 汉] ZHAO Peng, LU Xiao-feng, ZENG Bing, MEI Lin (Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 420 ~ 423

On a new type semi-industrial cold state test rig for mixed-flow type fluidized bed slag coolers, experimentally studied was the influence of the fine ash material return characteristics when the partition wall height of the elutriation chamber was 900 ~ 1100 mm, fluidized air speed changed in a range of 2 ~ 6 m/s, the static bed height of the cooling chamber 400 ~ 650 mm, the fluidized air speed 0.1 ~ 0.7 m/s and the elutriation time duration changed in 4 ~ 12 min. Moreover, the above-mentioned material return characteristics were tested and analyzed when both chambers were in operation simultaneously. It has been found that the material return quantity from the elutriation chamber will linearly increase with an increase of the fluidized air speed at a fixed partition wall height, occupying 20% of the material intaking quantity at a partition wall height of 1 000 mm and an elutriation air speed of 4 m/s, while