

截短过热器分隔屏治理再热汽欠温的数值模拟

严林博,何伯述,裴晓辉,杨 敏

(北京交通大学 机电学院,北京 100044)

摘 要: 某电厂一期(2×600 MW)1 号煤粉锅炉实际运行中长期存在二次汽(再热汽)欠温、过热器减温水过量、水平烟道入口左右侧汽温偏差大的问题而对锅炉运行的安全性和经济性带来了不利影响,急需对此进行全面分析并治理改造。经初步理论分析及数值模拟研究,决定对过热器分隔屏受热面进行截短改造。为了掌握分隔屏截短改造前后炉膛出口(水平烟道入口)烟气流场的变化情况,特别是在水平烟道入口是否形成烟气走廊,针对分隔屏分别截短 1、2 及 3 m 前后的炉内等温流场进行了数值模拟研究,特别关注水平烟道入口流场的变化情况。根据数值模拟计算和热力校核计算结果的综合分析与对比,对分隔屏进行了截短 2 m 改造。实际运行表明,各负荷下二次汽温达到了设计值、过热器减温水平均下降了 30 t/h 左右、左右侧汽温偏差明显减少、炉膛出口(水平烟道入口)没有形成烟气走廊,改造取得了满意的效果。该改造方式对国内存在有类似问题的锅炉具有重要的参考意义。

关 键 词: 煤粉锅炉; 过热器; 二次汽; 分隔屏; 数值计算
中图分类号: TK223 **文献标识码:** A

引 言

1978 年我国发电装机容量占全球总发电装机容量的比例不到 3%,2008 年已超过 15%^[1]。目前,一些大型锅炉运行中仍存在着影响机组可靠性、经济性、可调性和环保性能、甚至影响机组满出力的问题,这些问题既有运行管理方面的原因,也有设计、制造与安装质量方面的原因,还有实际燃烧煤质与设计煤质相差太大等原因^[2]。针对这些实际工程中出现的问题,一些研究者做了大量细致的研究工作^[3~8],并取得了实效,同时对一些特别问题如烟气偏差等也开展了深入的研究^[9~12],使大型电站锅炉的运行更加安全经济。

某电厂一期工程安装 2×600 MW 国产燃煤机组,机组自投运以来,两台锅炉都存在非满负荷下二次汽欠温的问题,对机组运行的安全性和经济性构

成了威胁,急需对其进行优化改造。经论证分析,决定对过热器分隔屏受热面进行截短 2 m 改造。但是分隔屏截短后,屏对炉内旋转上升气流的切割作用将有所减弱,水平烟道入口会否出现烟气短路,继而加剧水平烟道内汽温的左右侧偏差。为了掌握分隔屏截短改造前后炉膛出口烟气流场的变化情况,特别是在水平烟道入口会否形成烟气走廊,对分隔屏进行分别截短 1、2 和 3 m 的处理改造前后炉内等温流场、特别是炉膛出口的速度分布变化情况,考察分隔屏截短后炉膛出口,即水平烟道入口截面的流场是否出现恶化左右侧流动偏差的流动结构,炉膛出口是否出现烟气短路现象。本研究进行了数值模拟,从流场结构的角度为分隔屏截短改造提供理论依据。

1 设备简介与现存问题

某电厂一期工程 2×600 MW 锅炉是根据美国 ABB-CE 公司技术设计制造并配 600 MW 汽轮发电机组的亚临界压力带一次中间再热控制循环汽包锅炉。锅炉最大连续蒸发量为 2 030 t/h,过热器、再热器蒸汽出口温度为 541 ℃,给水温度为 282.5 ℃。

该电厂一期工程自投产以来,满负荷下主要运行参数基本都能达到设计值,但锅炉一直存在非满负荷下二次汽欠温的问题。在非满负荷下,如 75% THA(汽机热耗验收工况)时,末级再热器出口汽温的统计值为 535.35 ℃;50% THA 时的统计值为 530.77 ℃,而再热器出口汽温设计值在非满负荷时都为 541 ℃,此外,锅炉运行时左右侧汽温偏差也比较严重。这些问题都严重威胁锅炉机组长期安全、稳定、经济运行,急需对锅炉受热面实施相应的技术改造,提高非满负荷下二次汽温度,消除不稳定及不安全因素,同时提高机组的经济性^[13]。

收稿日期:2010-01-05; 修订日期:2010-09-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009JBZ017-4)

作者简介:严林博(1987-),男,陕西华阴人,北京交通大学博士研究生。

2 改造方案及数值计算区域

针对该锅炉的实际问题,经过全面的热力校核计算后^[14~16],决定对锅炉上炉膛内的6片过热器分隔屏实施截短2 m的改造,以减少过热器受热面的吸热量,提高炉膛出口烟温,增加再热器受热面的吸热量,以解决二次汽欠温的问题,提高机组的经济性。

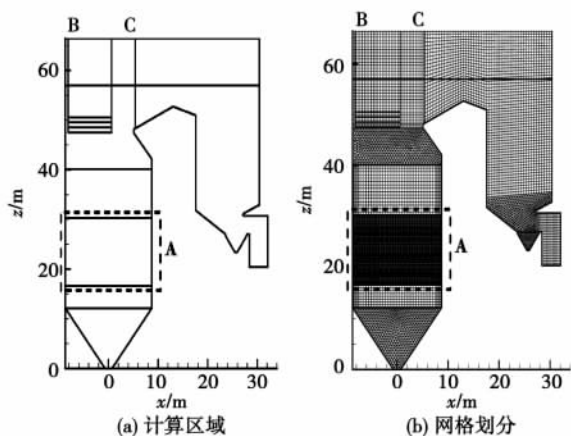


图1 数值计算对象及网格划分

数值计算包括锅炉炉膛本体至空气预热器入口的烟气流动区域,如图1(a)所示,坐标原点为冷灰斗底部几何中心; x 轴指向炉后方向; y 轴由右墙指向左墙方向; z 轴为炉膛高度方向;计算区域的网格划分如图1(b)所示。图1中虚框所示的A区域为燃烧器布置区域;B区为分隔屏布置区域,沿炉宽方向布置6片;C区为后屏布置区域,沿炉宽方向布置24片。计算时将6片大分隔屏和24片后屏近似处理为零厚度的无孔平板,不考虑每片屏的孔隙对流动的影响,这种简化对燃烧器区域的空气动力场分布影响甚微,对炉膛出口流场会有一些影响,但不会改变截屏改造前后炉膛出口流场的变化趋势。

为尽可能避免数值模拟过程中经常会遇到的假扩散问题,对于炉膛燃烧器区域(区域A)采用非结构四边形网格。该网格在燃烧器区域加密,网格线基本和射流方向平行,有效地抑制计算伪扩散,且具有较高的网格质量^[17],同时对流项差分格式采用QUICK格式,以在离散格式上抑制伪扩散的产生。锅炉计算区域采用六面体和四面体混合网格。

锅炉进出口边界条件为:一次风速17.176 1 m/s;二次风速22.101 6 m/s;燃尽风22.101 6 m/s;油二次风11.086 47 m/s;压力出口表压为零。其中油

二次风指锅炉正常运行时通过点火油枪送入炉膛的二次风。

3 数值计算结果及分析

计算对象内的等温稳态流动可由下述控制方程描述,即:

$$\nabla(\rho \vec{V}\phi) = \nabla(\Gamma_{\phi} \nabla \phi) + S_{\phi}$$

方程中通量及源项如表1所示^[18~20],其中 ϕ 为广义变量; Γ_{ϕ} 为广义扩散系数; S_{ϕ} 为广义源项。使用商业软件Fluent对分隔屏改造前后的流场进行了数值计算^[21],结果如图3和图4所示。

表1 控制方程的通量及源项

ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}	常数
1	0	0	$\sigma_k = 0.9$
u	$\mu_e - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\rho k)$		$\sigma_{\varepsilon} = 1.22$
v	$\mu_e - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\rho k)$		$C_{\mu} = 0.09$
w	$\mu_e - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\rho k)$		$C_1 = 1.44$
k	μ_e / σ_k	$G_k - \rho \varepsilon$	$C_2 = 1.92$
ε	$\mu_e / \sigma_{\varepsilon}$	$C_1 G_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$	—

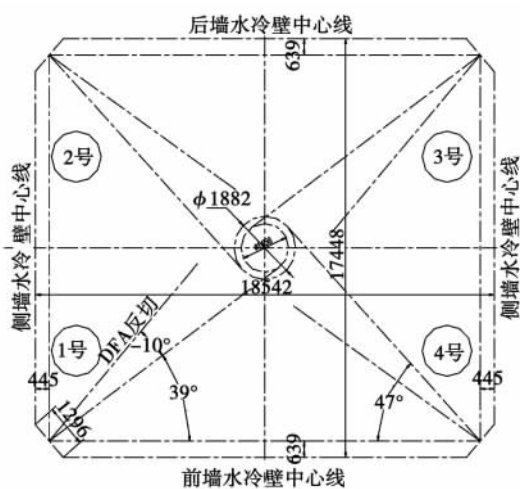
$$G_k = \mu_e \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \mu_e = \mu_1 + \mu_2; \mu_1 = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$$


图2 燃烧器切圆布置示意图

燃烧器切圆布置如图2所示,1、3角切圆直径为 $\phi 1458$;2、4角切圆直径为 $\phi 1882$ 。燃烧器设置2层OFA(燃尽风)气流(OFA-1和OFA-2),与一次风

射流反切 10°,反切风的投入没有改变主气流的旋向(俯视逆时针旋转)。

图 3 为分隔屏几何中心水平截面上改造前后的速度分布。可以看到,改造前后,烟气在水平烟道的流动过程中速度逐渐趋于均匀,在接近尾部烟道进入转向室前,左右侧速度已经基本一致。改造后左

侧靠墙附近气流的速度降低,在大致相同的区域内,改造前左侧速度最小显示为 1 m/s,而改造后基本都在 0.5 m/s。从靠近右侧墙 x 大约为 10 m 处的速度等值线图随着截屏长度的增加而不断向 x 正方向,即炉后延展可以看出,改造后靠右侧墙区域的合速度有所增加。

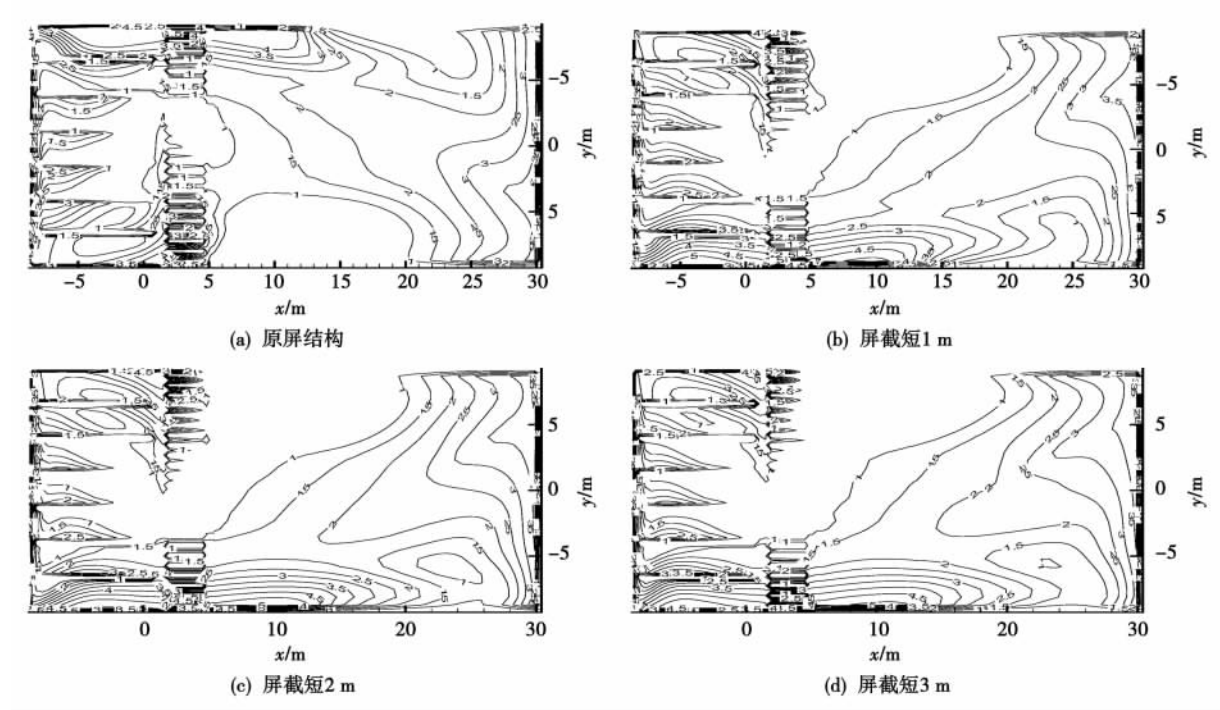


图 3 分隔屏几何中心水平截面上的速度分布

图 4 为水平烟道入口截面(炉膛出口截面,位于折焰角鼻端正上方)改造前后的合速度及 x 方向分速度 v_x 的分布,可以看到改造前后该截面上的气流结构仅有微小变化: 从左侧区域 0.5 和 1 m/s 的速度等值线随着截屏长度的增加而不断向右侧墙靠拢的趋势可以看出,将分隔屏截短后,炉膛出口截面左侧区域的烟气流动合速度将有所降低。从 v_x 速度分布看,随着截屏长度的增加,截面下部回流区略有减小,截面右下角速度也有微小增加,产生烟气走

廊的趋势很小,可以忽略。
为了明确分隔屏截短后水平烟道入口截面的流量及速度变化情况,特考察与屏截短后水平烟道入口截面上分隔屏截短后右侧 1/3 截面的流场细节,所考察的截面区域如图 4 中的虚线方框所示。该区域水平烟道入口截面高度为 2.388 m,面积为 14.759 4 m²,为总截面面积的 4.35%。有无烟气走廊形成,可以看该截面的 v_x 分速度及体积流量是否显著增加,它们的变化情况如表 2 所示。

表 2 对应于截短屏的水平烟道入口截面主要参数对比

	面积/m ²	体积流量/m ³ ·s ⁻¹	体积流量占总流量比例/%	平均速度/m·s ⁻¹	最大速度/m·s ⁻¹
改造前	14.759 4	29.487 1	5.683	1.997 8	3.747 5
截短 1 m	14.759 4	34.251 3	6.601	2.320 6	3.931 1
截短 2 m	14.759 4	40.179 7	7.744	2.722 3	4.383 0
截短 3 m	14.759 4	38.867 7	7.491	2.633 4	4.315 2

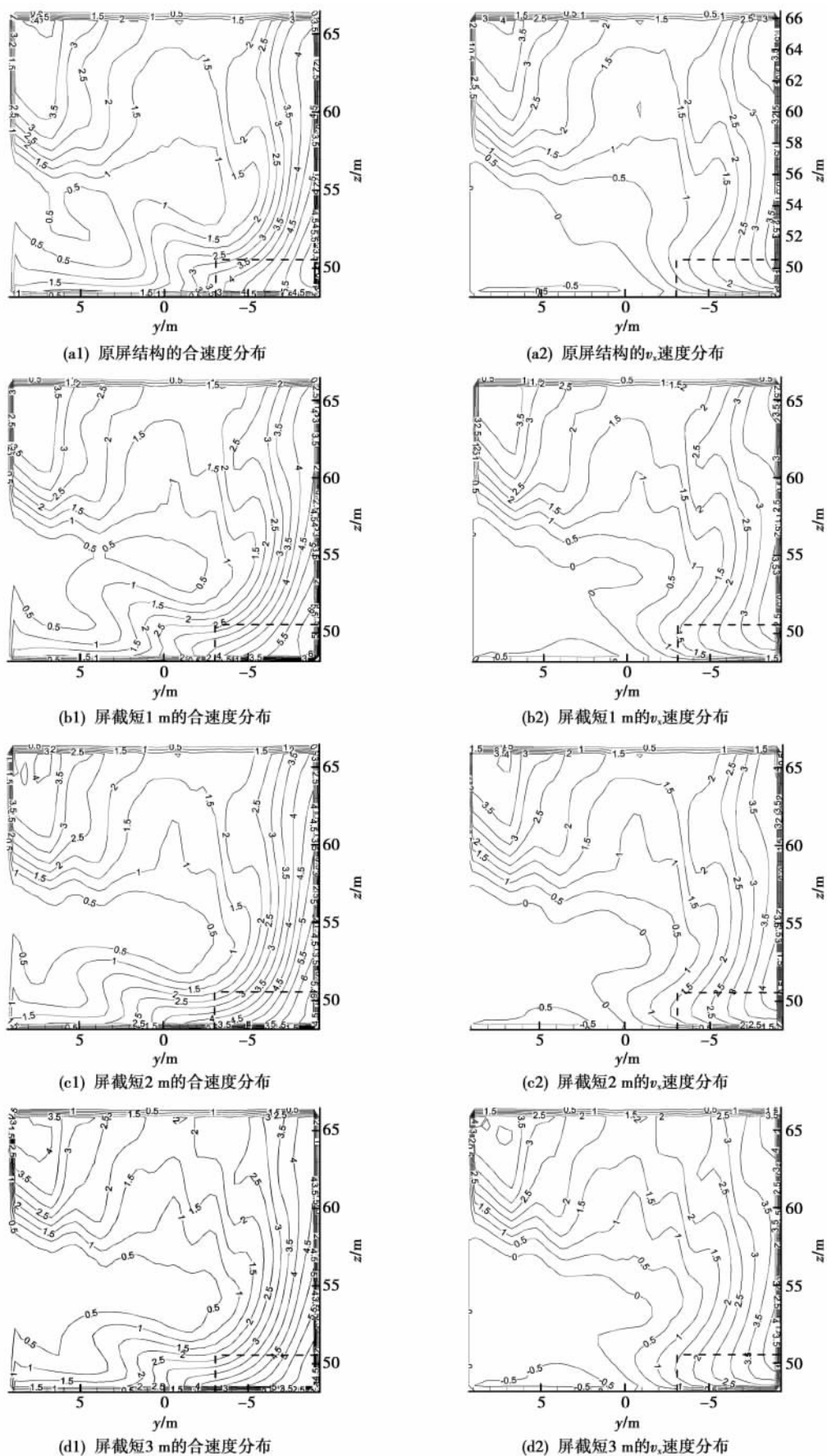


图4 水平烟道入口竖直截面上的速度分布

从表 2 可以看出,将分隔屏截短后,靠近水平烟道右侧墙部分的体积流量随着截屏长度的增加而增加,但在分隔屏截短 3 m 时又有下降趋势,而且相对

于总流量的变化很小, v_x 及体积流量都没有显著的增加,不会形成烟气走廊。

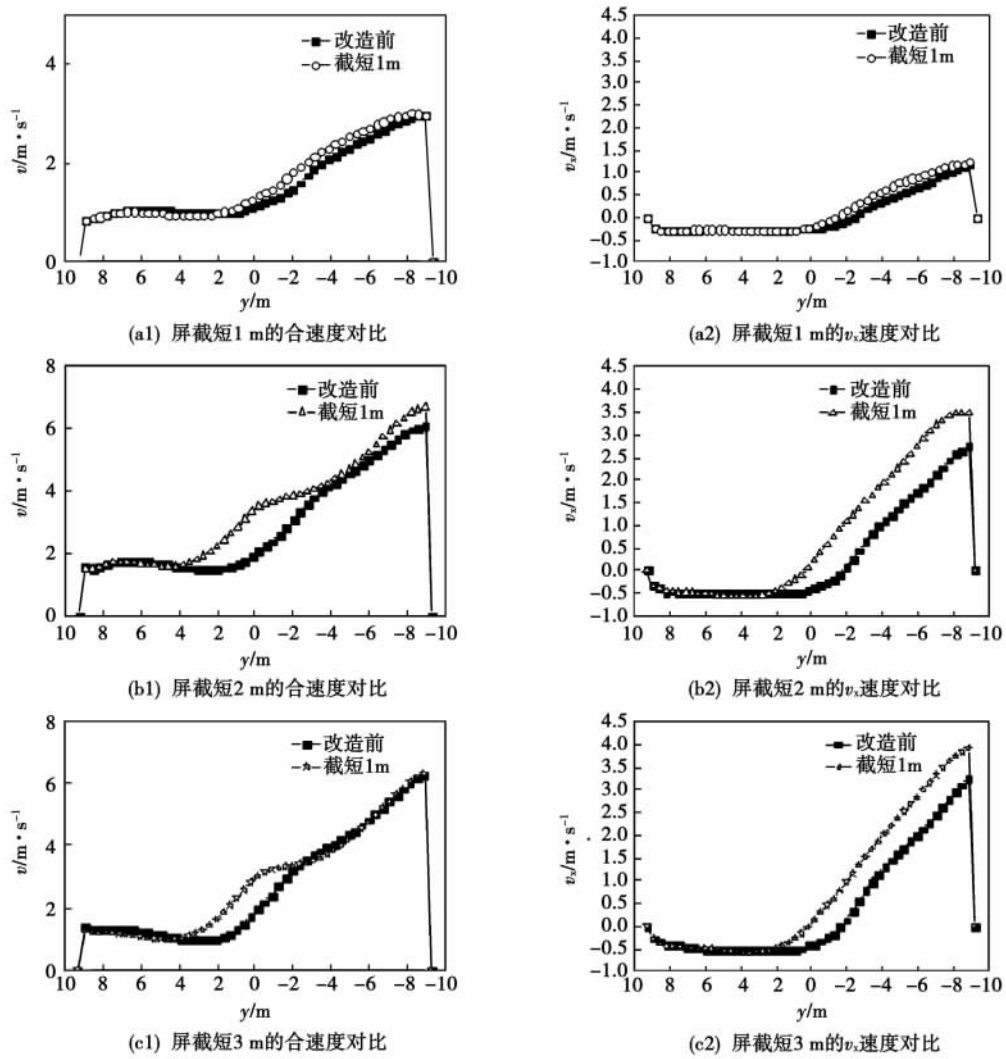


图 5 屏截短改造前后对应的水平烟道入口截面中心水平线上速度分布对比

为了更直观起见,将水平烟道入口对应改造截面的中心线上改造前后合速度对比及分速度 v_x 对比于图 5 中。从合速度对比图中可以看出,在靠近左墙区域,改造前与改造后的速度大小基本相等;靠近右侧墙区域,改造后速度略有提升。其中,分隔屏截短 2 和 3 m 的工况,截面靠近中心区域合速度较改造前有较大提升,这有利于缓解左右汽温偏差。从 v_x 分速度对比图中可以看出,在靠近左墙区域,改造前后的速度大小基本相等,靠近右侧墙区域,改造后 v_x 分速度有一定提升,并且回流区大小随着截屏长度的增加而不断减少,支持了不会形成烟气走廊的结论。

4 实际运行效果

实施分隔屏截短 2 m 改造后,1 号锅炉运行稳定,关键参数达到设计值。本次改造的主要目的是解决锅炉在非满负荷工况下二次汽欠温的问题,统计的运行数据显示这个问题得到了很好的解决^[15~16],如表 3 所示。

表 3 改造前后二次汽温度对比

负荷/MW	改造前二次 汽温度/℃	改造后二次 汽温度/℃	改造前后 差值/℃	修正后 差值/℃
600	544.37	547.10	2.73	0.00
450	535.35	546.21	10.86	5.65
300	530.77	546.61	15.84	10.23

由表 3 可见,在所有的负荷工况下,二次汽均没有出现欠温问题,甚至存在一定的超温现象(可以通过运行调整予以解决)。综合改造前后不同负荷稳定工况下的二次汽统计值,改造后使二次汽温度上升 $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。按 70% 负荷率考虑,可使发电煤耗下降约 $1.19\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

运行统计数据还显示,受热面改造实施后,过热减温水量平均下降 $\sim 30\text{ t/h}$ ^[16],两侧减温水量的差值减小,在一定程度上表明左右侧汽温偏差问题得到了改善。

5 结 论

因某电厂一期 1 号煤粉锅炉实际运行中存在二次汽欠温、过热器减温水过量、水平烟道入口左右侧汽温偏差大的问题而对锅炉运行的安全性和经济性带来了不利影响。实施过热器分隔屏受热面截短改造可以较好地解决二次汽欠温问题,对其它问题也可以予以部分解决或缓解,有利于提高机组经济性 & 受热面的运行安全性。

(1) 数值模拟结果显示,分隔屏截短后对炉内流场总体上影响甚微。水平烟道入口截面的流动结构几乎没有变化,但是截面下部速度和流量均略有增加,右侧墙下部区域不会出现烟气走廊;

(2) 从数值模拟数据上看,分隔屏截短后有利于减少左右侧汽温偏差,和改造后锅炉实际运行数据吻合;

(3) 运行统计数据表明,改造后所有的负荷工况下,二次汽均没有出现欠温问题,锅炉总体经济性得到提高,安全可靠也得到了改善;

(4) 建议校核、调整或改造燃烧器,组织良好的炉内空气动力场,进一步治理左右侧汽温偏差问题,提高机组运行的安全性。

参考文献:

- [1] 方燕平. 我国电力工业的发展与展望[J]. 电力系统设备, 2009(4): 62 - 65.
- [2] 刘武成. 现代电站锅炉技术及其改造[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 张 翼, 李平洋, 赵成东. 某电厂 3 号炉空预器入口烟温低及

再热器温低的试验研究[J]. 热能动力工程, 2001, 15(6): 637 - 639.

- [4] 刘泰生, 姚本荣, 许晋源. 大型切向燃烧锅炉过、再热器布置方式初探[J]. 热能动力工程, 2000, 15(5): 560 - 563.
- [5] 王孟浩, 罗永浩, 张 谦, 等. 北仑发电厂 600 MW 锅炉高温再热器超温问题原因分析及改造[J]. 中国电力, 1999, 32(9): 14 - 16.
- [6] 袁 力. 2 290 t/h 锅炉受热面超温改造[J]. 中国电力, 2003, 36(1): 82 - 85.
- [7] 翟德双. 1 913 t/h 锅炉过热器爆管原因分析[J]. 中国电力, 2009, 42(5): 22 - 25.
- [8] 王孟浩. 消除大容量电厂锅炉过热器及再热器局部超温的措施[J]. 中国电力, 2003, 36(3): 13 - 16.
- [9] 罗洪新, 徐海康. 国产首台 600 MW 二次汽温和空气预热器入口烟温偏低的原因分析和采取的对策[J]. 黑龙江电力, 2000, 22(3): 32 - 34.
- [10] 刘泰生, 姚本荣, 许晋源. 切向燃烧锅炉中屏结构对烟气偏差影响的试验研究[J]. 动力工程, 2000, 20(5): 842 - 846.
- [11] 范卫东, 韩小岗, 郝卫东, 等. 顶棚过热器受热面管流量偏差问题的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 343 - 348.
- [12] 薛 雷, 刘 引, 别如山. 哈锅 600 MW 亚临界电站锅炉新技术研究[J]. 黑龙江电力, 2004, 26(1): 16 - 19.
- [13] 严林博. 哈锅 660 MW 四角切圆煤粉锅炉受热面优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [14] 何伯述, 李鸣扬, 严林博. 锅炉热力计算软件 V1.0, 计算机软件著作权(软著登字第 BJ22489 号), 2009. 8.
- [15] 孟建国, 曹建臣, 严林博, 等. 通过受热面改造解决再热汽温低问题[J]. 华北电力技术, 2010, 4: 27 - 31.
- [16] 严林博, 何伯述, 孟建国, 等. 600 MW 燃煤锅炉二次汽欠温改造及实施效果[J]. 热能动力工程, 待发表(2011 年第二期) .
- [17] 潘 维, 池作和, 斯东波, 等. 四角切圆燃烧锅炉炉膛网格生成方法的研究[J]. 动力工程, 2005, 25(3): 349 - 363.
- [18] HE BOSHU, ZHU LAIYU, WANG JIANMIN, et al. Computational fluid dynamics based retrofits to reheater panel overheating of No. 3 boiler of Dagang Power Plant[J]. Computers and Fluids, 2007, 36: 435 - 444.
- [19] HE BOSHU, CHEN MEIQIAN, YU QIUMEI, et al. Numerical study of the optimum counter-flow mode of air jets in a large utility furnace[J]. Computers and fluids, 2004, 33: 1201 - 1223.
- [20] 陶文铨. 数值传热学[M]. (第二版). 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [21] FLUENT6.3-User's guide[M]. Lebanon: Fluent Inc, 2006.

(编辑 陈 滨)

A multi-turn annulus tube was used for measuring the parameters of a gas-liquid two-phase flow, and the pressure difference fluctuation signals at both inside and outside of the riser section of the annulus tube along the horizontal direction were analyzed. A non-dimensional analytic method was used to obtain the characteristic value related to the mean square root of the pressure difference fluctuation signals and a model governing the relationship between the characteristic value in question and the volumetric gas content. On this basis, an experiment was performed. By making use of the excellent nonlinear mapping and strong generalization capacity of a supportive vector machine, a model for softly measuring the gas content was established based on the least square supportive vector machine and corresponding systematic configuration and algorithm were given. In the light of the specific feature that it is difficult to choose parameters by using the LS-SVM method, the genetic algorithm was used to perform optimization to enhance the precision of the soft measurement. The simulation and practical operation results show that the model for soft measurement of the gas content in a gas-liquid two-phase flow based on the LS-SVM has a relatively high estimation precision and generalization capacity, thus providing a new simple and reliable method for measuring a gas content in a gas-liquid two-phase flow. **Key words:** soft measurement, least square supportive vector machine, genetic algorithm, two phase flow, pressure difference fluctuation signal, gas content

加热器内部泄漏故障的实验研究 = **Experimental Study of Inner Leakage Accidents of a Heater** [刊, 汉] ZHANG Xiao, LI Lu-ping, RAO Hong-de (College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) , CHEN La-min (Zhuzhou Huayin Thermal Power Generation Co. Ltd. , Zhuzhou, China, Post Code: 412005) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 63 ~ 66

Inner leakage accidents in HP heaters constitute the main accidents occurring to the recuperation system of a thermal power plant. An experimental study was performed of the leakage accidents of a heater and a HP heater leakage simulation test stand was designed and set up. Through an experimental study and data processing, the law governing the variation of three parameters, namely, the maximum energy value, maximum frequency value and average frequency of the leakage sound transmission signals under different operating conditions, was identified when any leakage accident occurs in hopes of accurately providing relevant parameter characteristics of the leakage. This will be helpful for the early diagnosis and elimination of the above-mentioned accidents. **Key words:** HP heater, leakage accident, sound transmission technology, HP heater simulation test stand

截短过热器分隔屏治理再热汽欠温的数值模拟 = **Numerical Simulation of a Remedy of an Excessively Low Reheated Steam Temperature by Cutting Short the Partition Platens of a Superheater** [刊, 汉] YAN Lin-bo, HE Bo-shu, PEI Xiao-hui, et al(College of Electromechanical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 67 ~ 72

During the actual operation of No. 1 pulverized coal-fired boiler in the first phase of a power plant (2×600 MW) , the following problems existed for a long time, namely, an excessively low secondary steam (reheated steam) temperature, an excessively large amount of superheater desuperheating water and an excessively large steam temperature deviation between the left and right side of the horizontal flue gas duct at the inlet. These problems brought a-

bout an adverse influence on the operation safety and cost-effectiveness of the boiler and made it urgently necessary to conduct a comprehensive analysis, remedy and modification. Through a preliminary theoretical analysis and numerical simulation study, it was decided to perform a short-cut reconstruction of the heating surface of the partition platens of the superheater. To know well the variations of the flue gas flow field at the outlet of the furnace (inlet of the horizontal flue gas duct) before and after the reconstruction by cutting short the partition platens, especially, whether a flue gas corridor has been formed or not at the inlet of the horizontal flue gas duct, the reconstruction by cutting short by 1, 2 and 3 meters of the partition platens respectively was studied and a numerical simulation study was performed of the in-furnace isothermal flow field before and after the reconstruction with special attention paid to the variations of the flow field at the inlet of the horizontal flue gas duct. Based on a comprehensive analysis and contrast of the numerical simulation calculation and thermodynamic check calculation results, it was decided to perform a reconstruction to cut short 2 meters of the partition platens. The practical operation shows that at various loads, the secondary steam temperature can reach the design value, the desuperheating water fed into the superheater averagely drops by about 30 t/h, the steam temperature deviation between the left and right side conspicuously decreases and no flue gas corridor is formed at the outlet of the furnace (inlet of the horizontal flue gas duct), thus a satisfactory effectiveness has been achieved for the reconstruction. The reconstruction method in question is of important reference significance for domestically-made boilers having problems of the same kind. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, superheater, secondary steam, partition platen, numerical calculation

恒温热源不可逆中冷回热布雷顿热电联产装置的炯经济性能优化 = **Exergoeconomic Performance Optimization of an Irreversible Intercooling Recuperative Brayton Cogeneration Plant With a Constant Temperature Heat Source** [刊, 汉] YANG Bo, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Postgraduate School, Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). - 73 ~ 78

By adopting the finite-time thermodynamic theory and method, studied was the exergoeconomic performance of an irreversible intercooling recuperative Brayton cogeneration plant with a constant temperature heat source and derived was an analytic formula for calculating a non-dimensional profit rate and exergy efficiency. With the profit rate and exergy efficiency serving as the targets, an optimization was performed of the distribution of the heat conductivities and choice of the intermediate pressure ratio through a numerical calculation. On this basis, the maximum profit rate and exergy efficiency were obtained. With the total pressure ratio being further optimized, a dual maximum profit rate was obtained but no dual maximum value for the exergy efficiency existed. Through a detailed analysis of the influence of the design parameters on the optimum performance of the plant, it has been found that there exists an optimum user-side temperature to make the profit rate have a triple maximum value. **Key words:** finite time thermodynamics, Brayton cogeneration plant, exergoeconomic performance, optimization

两级烟气余热回收发电系统工质优选原则及方法 = **Principles and Methods for Choosing an Optimal Working Medium for a Two-stage Flue-gas Waste Heat Recovery Power Generation System** [刊, 汉] YANG Hong-jun, FAN Shuan-shi, LI Jing, et al (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy-saving, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: