

410t/h 六角切圆锅炉水煤浆燃烧试验与数值模拟

丁宁¹, 张传名², 曹欣玉¹, 杨玉林¹, 周俊虎¹, 刘建忠¹, 岑可法¹

(1. 浙江大学热能工程研究所, 能源洁净利用与环境工程教育部重点实验室, 浙江省杭州市, 310027;
2. 汕头万丰热电有限公司, 广东省汕头市 515000,)

Experimental Research and Numerical Simulation on Combusting CWS in 410t/h Six-corner Tangentially Firing Boiler

DING Ning¹, ZHANG Chuagn-ming², CAO Xin-yu¹, YANG Yu-lin¹,
ZHOU Jun-hu¹, LIU Jian-zhong¹, CEN Ke-fa¹

(1. Clean Energy and Environment Engineering Key Laboratory of MOE, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 2. Shantou Wanfeng Heat Power Ltd. Shantou 515000, China)

ABSTRACT: The experimental research on combusting CWS was carried out in the Maoming Thermal Power Station 410t/h six-corner tangentially firing boiler. When combusting CWS, the boiler can reach rated load and designed performance, the combustion efficiency can reach 99.7%, the thermal efficiency can reach 91.5%, and the combustion is stable. On the basis, numerical simulation on combusting CWS in the boiler is carried out. The thermal aerodynamic characteristic and temperature field are researched, CWS particles combusting characteristics and distributing rules of O₂, CO₂, NO_x and H₂O are analyzed, the numerical simulation results are consistent with the combustion experiment, which is effective to practical production for the reconstruction and operation of large-scale CWS boiler in future.

KEY WORDS: thermal power engineering; boiler; combustion; CWS; numerical simulation; six-corner

摘要: 对茂名热电厂 410t/h 电站锅炉进行了水煤浆的燃烧试验, 锅炉运行性能良好, 燃烧效率达到 99.7%, 锅炉热效率达到 91.5%; 在此基础上, 进行了水煤浆燃烧的数值模拟, 对六角切向布置水煤浆燃烧锅炉热态空气动力场和温度场进行了研究, 分析了水煤浆电站锅炉炉内水煤浆颗粒燃烧的特点, 并对炉内 O₂、CO₂、NO_x 与 H₂O 等物质的分布规律进行了分析, 数值模拟结果与燃烧试验吻合得很好, 为今后大型水煤浆电站锅炉的改造和运行提供了很好的指导作用。

关键词: 热能动力工程; 锅炉; 燃烧; 水煤浆; 数值模拟; 六角

0 引言

国家经贸委在节约和替代燃料油十五规划^[1]中指出: “到2005年全国节约和替代燃料油1600万吨, 其中替代燃料油1262万吨, 占78.9%”, 在煤代油这一精神的指导下, 茂名热电厂将410t/h燃油电站锅炉改烧水煤浆, 该项目于2001年11月被列为第二批国家重点技术改造“双高一优”项目。

当前, 我国电站燃油锅炉改烧水煤浆改造项目已投入运行的锅炉最大容量^[2]为 230t/h, 国外也未见同类容量燃油设计锅炉改烧水煤浆的报导, 缺乏改造的经验; 受结构上的限制, 改造后炉膛长、宽比高达 1.5:1, 采用国内外少见的六角切圆燃烧布置方式, 改造后要求能达到 100%额定负荷并实现水煤浆 100%代油的目标, 改造难度大。

本文对茂名热电厂改造后 410t/h 六角切圆电站锅炉进行了水煤浆燃烧的试验研究与数值模拟, 数值模拟结果与燃烧试验吻合得很好, 为今后大型水煤浆电站锅炉的改造和运行提供了指导作用, 茂名热电厂 410t/h 电站锅炉水煤浆燃烧的成功, 标志着在我国水煤浆的应用又上了一个新台阶。

1 燃烧试验与数值模拟内容

1.1 410t/h水煤浆电站锅炉简介

茂名热电厂 410 t/h 燃油设计的平底锅炉改烧水煤浆后, 炉膛截面积变为 11.99 m×8.07 m, 其长

宽比为 1.5:1, 受该锅炉结构的限制, 采用一种直流燃烧器六角切圆的布置方式, 前后墙各有两组, 两侧墙各有一组燃烧器, 假想几何切圆直径为 $f750\text{mm}$ 。改造后 410 t/h 水煤浆锅炉纵向剖面图见图 1。

在各角燃烧器上, 从下往上依次布置有下二次风、下一次风、中二次风、上一次风、上二次风和燃尽风, 其中, 燃尽风采用反切圆布置方式, 以减少炉内的扭转残余, 燃烧器六角切圆布置见图 2。

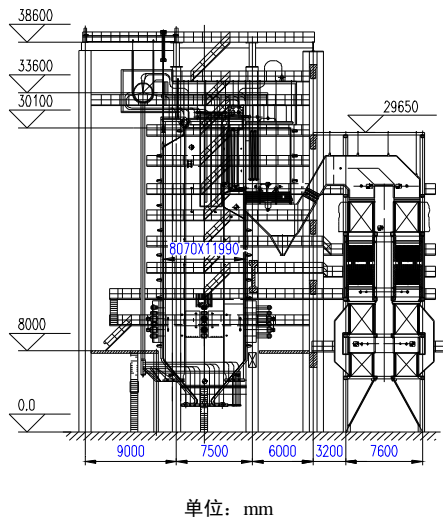


图 1 410t/h 水煤浆锅炉纵向剖面图

Fig. 1 Longitudinal profile of 410t/h CWS boiler

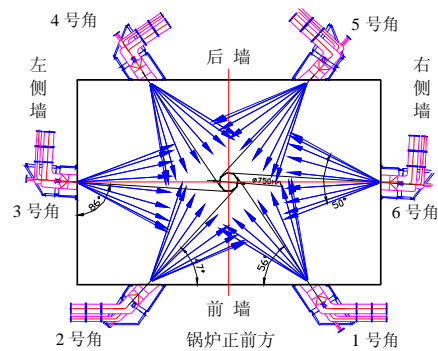


图 2 燃烧器六角切圆布置图

Fig. 2 Six-corner layout drawing of burners

1.2 数值计算模型

本文以改造后茂名热电厂 410t/h 六角切圆电站锅炉为模拟对象, 在炉膛底部模拟了冷灰斗, 炉膛上部模拟了折焰角, 整个模拟区域较大以提高模拟精度, 数值模拟水煤浆锅炉结构见图 3。划分网格时采用交错、非均匀六面体、四面体网格, 并把燃烧器及固体壁面附近区域划分得密集。前墙和后墙之间炉膛中心线如图 3 中 A-A 所示, 左侧墙和右侧墙之间炉膛中心线如图 3 中 B-B 所示。

数值模拟采用三维稳态计算, 为了避免伪扩散

的产生^[3], 利用 QUICK 格式进行方程的离散, 并采用 SIMPLEC 算法求解, 与现场水煤浆燃烧情况一致, 采用速度入口和压力出口的边界条件, 壁面上应用非滑移条件。水煤浆颗粒的平均粒径为 $65\mu\text{m}$, 其元素分析与工业分析见表 1。

在进行水煤浆动力特性的数值模拟时, 湍流模拟采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[4], 水煤浆颗粒跟踪采用拉格朗日离散相模型(DPM)模拟^[5]; 在进行水煤浆燃烧特性的数值模拟时, 用 P-1 模型计算辐射传热, 用两个平行的反应模型模拟水煤浆颗粒中挥发份的析出^[6], 焦炭的燃烧采用动力-扩散控制的燃烧反应模型, 气相湍流燃烧采用概率密度函数(PDF)法模拟^[7]。与煤粉不同的是: 对于水煤浆燃烧, 关键是对水煤浆雾化效果的模拟和对水煤浆水分蒸发的处理。

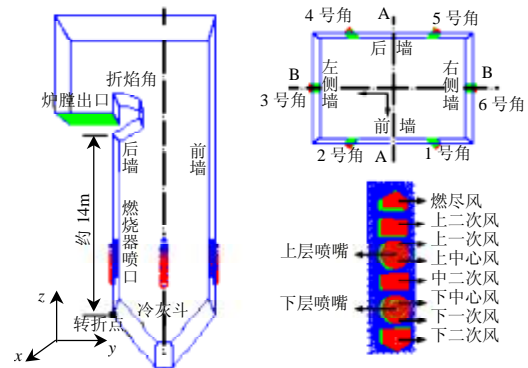


图 3 数值模拟水煤浆锅炉结构图

Fig. 3 Structure of CWS boiler for numerical simulation

表 1 水煤浆的元素分析与工业分析

Tab. 1 Elementary analysis and industrial analysis of CWS

元素分析/%				
C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}
50.6	3.2	6.98	0.56	0.35
工业分析				
$A_{ar}/\%$	$W_{ar}/\%$	$Q_{ar.net}/(\text{MJ}/\text{kg})$		
5.81	32.5	19.19		

1.3 水煤浆雾化效果的模拟

水煤浆雾化采用 6 t/h 撞击式喷嘴^[8], 其结构示意图见图 4, 水煤浆射流经水蒸汽雾化后从水煤浆喷孔射出, 设计雾化角为 50° , 射流速度高达 200~300m/s。

雾化后水煤浆颗粒以一定的初始速度和初始角度分别从水煤浆喷孔射出, 进入炉内燃烧。采用拉格朗日离散相模型跟踪水煤浆雾化颗粒运行轨迹, 其初始速度为 250 m/s, 射流位置和射流方向根据实际水煤浆喷嘴结构计算得出, 由于炉内布置上、下两层燃烧器, 每层有 6 支水煤浆喷嘴, 每支喷嘴上

含有 17 个水煤浆喷孔，一共跟踪了 $2 \times 6 \times 17 = 204$ 个水煤浆喷孔的射流情况，其射流示意图见图 2。

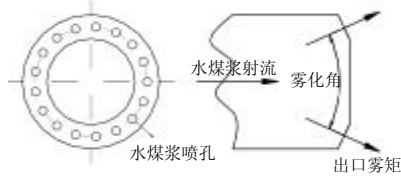


图 4 水煤浆喷嘴结构示意图

Fig. 4 Schematic plan of CWS nozzle

1.4 水煤浆水分蒸发的处理

燃料中的物理水分包含两方面：水煤浆中包含的 30%~35% 水分，雾化蒸汽提供大约 20%（与水煤浆燃料的质量比）的水分。在求解 PDF 输运方程时，将前一部分作为液态水 $H_2O(L)$ 处理，在燃烧过程中会吸收较多的热量而汽化；由于雾化时本身使用的就是水蒸汽，将后一部分作气态水 $H_2O(G)$ 处理，综合考虑了水煤浆和雾化蒸汽中的水分。

2 结果分析

2.1 410 t/h 六角切圆锅炉燃烧水煤浆试验分析

410 t/h 燃油锅炉改烧水煤浆工程完成后，在现场进行了水煤浆的燃烧试验，从试验可知：该锅炉燃烧水煤浆时均达到了额定工况下的设计参数，燃烧器出口附近和前墙火检孔处温度分别为 $1331^\circ C$ 和 $1408^\circ C$ ，排烟温度为 $144.9^\circ C$ ，排烟热损失为 7.55%，排烟处 O_2 和 CO_2 的含量分别为 7.54% 和 10.5%，飞灰可燃物含量为 2.58%，炉渣可燃物含量为 2.17%，固体不完全燃烧损失为 0.27%，燃烧效率为 99.7%，锅炉热效率为 91.5%，与煤粉炉相当，污染物排放量低， NO_x 和 SO_2 分别只有 $281 mL/m^3$ 和 $157 mL/m^3$ 左右，达到了理想的运行效果。

2.2 六角切圆水煤浆燃烧锅炉炉内流场分析

下一次风截面流场分布见图 5。一次风截面流场略呈现椭圆形分布，且存在 1 号、4 号角方向倾斜；燃烧器出口气流速度高达 $60 m/s$ 以上，是初始射流速度 $27.0 m/s$ 的 2 倍以上，分析原因，一次风、中心风射流进入炉膛后，与高速水煤浆雾矩发生动量交换，使得一次风、中心风射流速度迅速提升。

竖直截面 A-A 和 B-B 截面流场分布见图 6。从图中可见，在燃烧器区域附近，在炉膛高度方向上，炉膛中心存在速度约 $30 m/s$ 的“八”字形区域，该区域为炉内中心流场的主旋转区，燃烧化学反应主要发生在此处。

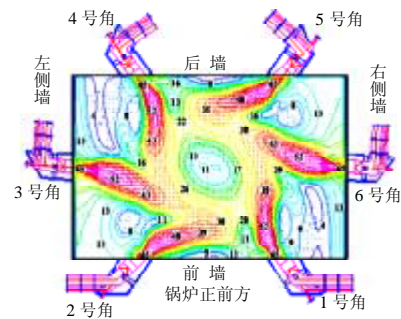


图 5 下一次风截面流场分布图

Fig. 5 Flow field of primary air section

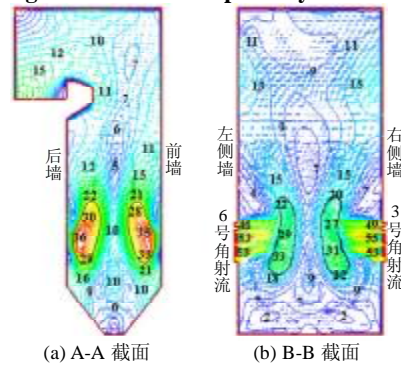


图 6 竖直截面 A-A 和 B-B 截面流场分布图

Fig. 6 Flow field of A-A and B-B sections

在 A-A 截面上，燃烧器段“八”字形区域之间平均距离约为 $4.1 m$ ，在 B-B 截面上，“八”字形区域之间平均距离约为 $3.3 m$ ，经计算可知，燃烧器段切圆平均放大倍数 $f=4.9$ ，与炉内冷态模拟热态试验^[9]燃烧器段切圆放大倍数 $f=4.8$ 非常相近。

炉膛中部区域(不包括冷灰斗与尾部烟道区)，旋转动量矩 I 随炉膛高度变化关系见图 7，从下二次风喷口附近开始，由于射流不断的进入炉内，旋转动量矩沿着炉膛高度方向呈线性迅速增加，在燃尽风喷口处，由于采用了燃尽风反切布置，反向旋转气流抑制住了旋转动量矩增加的趋势，最终基本保持恒定，直到折焰角附近才发现明显的衰减。

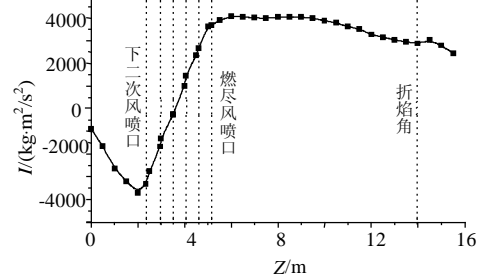


图 7 炉膛中部旋转动量矩随炉膛高度变化关系图

Fig. 7 Change chart of rotating momentum moment with the furnace height in the central section of furnace

2.3 水煤浆电站锅炉炉内温度场分析

下一次风截面温度分布见图 8, 从图中可见, 炉膛中心燃烧强烈, 温度较高, 分布比较均匀, 是水煤浆颗粒热解后的主要燃烧区域, 也正是采用切圆燃烧方式希望达到的效果。

由于一次风喷口也是水煤浆喷枪所在的位置, 在喷口附近两侧, 特别是逆主气流旋转方向的那一侧, 邻角气流补充氧气比较容易, 水煤浆颗粒容易着火燃烧, 着火点位于水煤浆雾矩的外侧, 并燃烧比较剧烈, 温度高达 1600 K 左右, 与试验测得的燃烧器出口附近平均温度 1604 K(1331℃)非常接近; 受高、长、宽比结构、六角切向布置的影响, 在前、后墙的着火位置比侧墙的着火位置更靠近壁面。

竖直截面 A-A 和 B-B 截面温度分布见图 9, 从图中可见, 燃烧器区域是整个炉膛中温度最高的地方, 受水分加热和气化吸热的影响, 燃烧器区域温度比煤粉锅炉^[10]低 100~200℃, 随着炉膛高度的增加, 温度不断下降, 但较煤粉锅炉缓慢。在前墙火检孔处的最高温度为 1707K, 与试验测得的温度 1681K(1408℃)误差只有 1.5%左右。

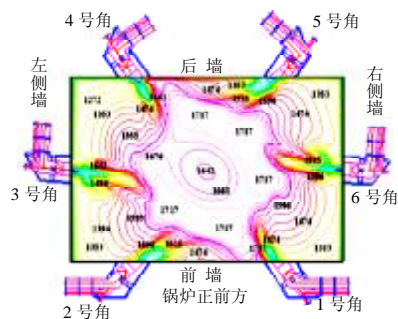


图 8 下一次风截面温度分布图

Fig. 8 Temperature of primary air section

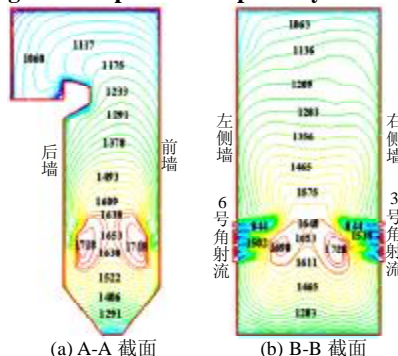


图 9 竖直截面 A-A 和 B-B 截面温度分布图
Fig. 9 Temperature of A-A and B-B sections

2.4 410 t/h 电站锅炉水煤浆燃烧分析

水煤浆颗粒运行速度衰减变化见图 10, 从图中可见, 在 0.01s 以内, 水煤浆颗粒运行速度从 250m/s

迅速衰减到 100 m/s 以下, 最后达到 50 m/s 左右的速度, 并基本保持不变, 这一速度与被加速后的一次风、中心风气流速度一致, 同时与二次风射流速度不相上下, 即水煤浆颗粒最终与炉内主气流以相同的速度作旋转运动。

在燃烧器出口处, 颗粒运行速度和气流速度之比在 5.0 以上, 水煤浆颗粒曳引气流加速运动, 在速度比达到 1.0 以前, 水煤浆颗粒运行行程约为 1.0~2.0 m, 此时, 焦炭着火并且燃烧速率达到极大值, 参见图 13。

下一次风截面颗粒浓度分布见图 11, 在水平面上, 水煤浆雾矩以极高的速度从水煤浆喷枪射出后, 在一次风、中心风的相互作用下, 扩散成圆锥形射流, 其锥角约为 30°~40°, 比设计雾化角 50°略低, 受到水煤浆雾矩内部负压的影响, 水煤浆雾矩略有收缩。

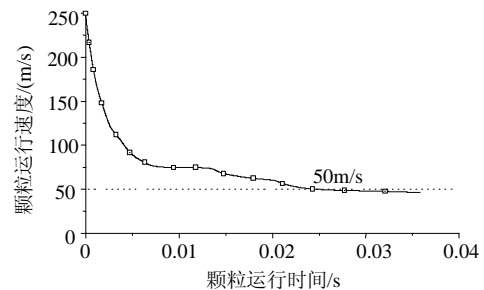


图 10 水煤浆颗粒运行速度衰减变化图

Fig. 10 Velocity attenuation of CWS particle

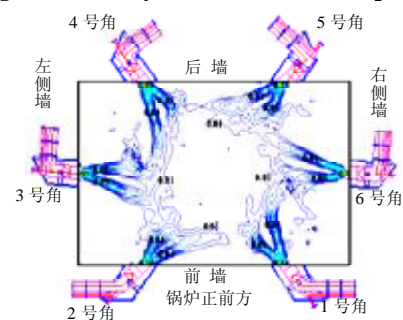


图 11 下一次风截面颗粒浓度分布图

Fig. 11 Particle concentration of primary air section

下一次风截面挥发分析出速率分布见图 12, 从图中见, 水煤浆雾矩射出后, 在一定区域内挥发分迅速析出。在前后墙上, 挥发分最大析出速率位置距喷口约为 0.8 m, 挥发分析出快, 最快高达 6 g/s 以上, 存在的区域小; 在两侧墙上, 挥发分最大析出速率位置距喷口约为 1.1 m, 挥发分析出比较缓慢, 最高只有 3 g/s 左右, 仅是前后墙挥发分析出速率的一半, 同时, 两侧墙附近挥发分存在的区域较前后墙大一倍左右, 这是由于两侧墙附近较前后墙

附近的温度低,挥发分析出速率与温度关系密切。同理,1 号角、4 号角水煤浆颗粒挥发分析出速率比 2 号角、5 号角高,与 1 号角、4 号角射流内侧温度较高有关。

下一次风截面焦炭燃烧速率分布见图 13,从图中可见,在挥发分析出之后,焦炭开始燃烧,在前后墙上,焦炭最大燃烧速率位置距喷口约为 1.4 m;在两侧墙上,焦炭最大燃烧速率位置距喷口约为 1.7m,距离挥发分最大析出位置 0.6 m 左右。在切向燃烧锅炉内,焦炭燃烧主要受扩散过程(频率因子)与动力控制(活化能)的影响,六个角的燃烧速率基本一致,与挥发分析出速率不同的是,后者受温度的影响比较大。

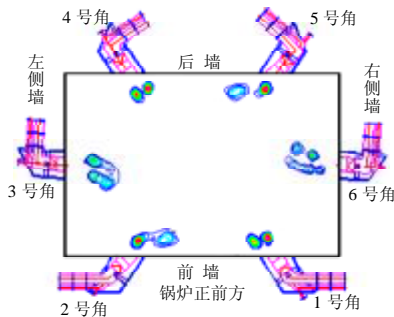


图 12 下一次风截面挥发份析出速率分布图
Fig. 12 Volatile separation rate of primary air section

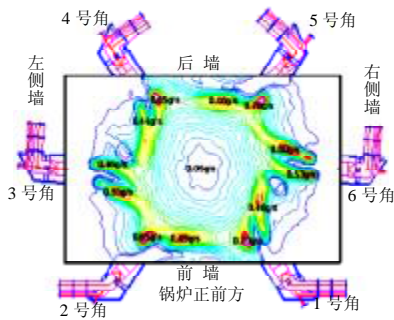


图 13 下一次风截面焦炭燃烧速率分布图
Fig. 13 Char combustion rate of primary air section

2.5 水煤浆电站锅炉炉内组分场分析

竖直截面 A-A 截面 O_2 体积浓度分布见图 14(a)。从图中可见,在燃烧器喷口附近含氧量最高,到炉膛中央逐渐迅速减小。随着炉膛高度的增加, O_2 浓度逐渐增加,分布更加均匀。在炉膛出口处 O_2 体积平均浓度为 7.1% 左右,与试验测得的数值 7.54% 基本一致。

竖直截面 A-A 截面 CO_2 体积浓度分布见图 14(b)。从图中可见,燃烧器喷口附近 CO_2 含量较低,至炉膛中心 CO_2 含量增加到 0.14 左右,随着炉膛高

度的增加, CO_2 含量有所降低;在炉膛出口处 CO_2 体积平均浓度为 10.8%,与试验值 10.5% 非常吻合。

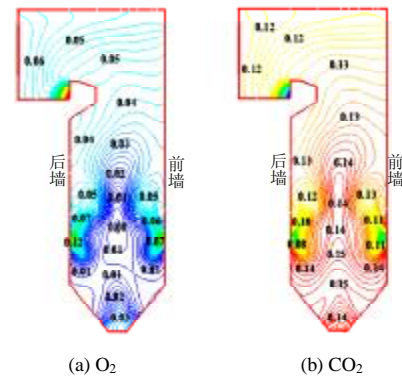


图 14 竖直截面 A-A 截面 O_2 和 CO_2 体积浓度分布图
Fig. 14 O_2 , CO_2 volume concentration of A-A section

竖直截面 A-A 截面 NO_x 体积浓度分布见图 15(a)。从图中可见, NO_x 浓度集中在高温区,与温度关系较大,在燃尽风截面附近, NO_x 浓度快速升高,高达 $600 mL/m^3$ 以上,此时以热力型 NO_x 为主;随着炉膛高度的增加,温度水平逐渐降低,由于 NO_x 的还原作用,其浓度有所减少,在炉膛出口 NO_x 浓度为 $332 mL/m^3$,试验时测得 $281.0 mL/m^3$,由于试验时烟气中存在大量 H_2O ,同时烟气温度降低,测量值有所偏小。

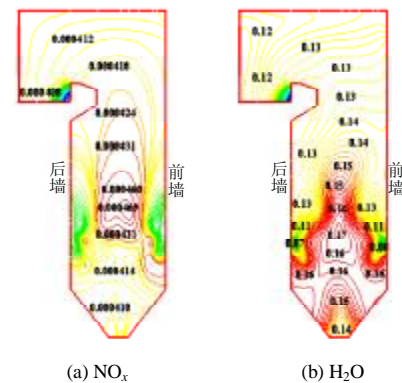


图 15 竖直截面 A-A 截面 NO_x 和 H_2O 体积浓度分布图
Fig. 15 NO_x , H_2O volume concentration of A-A section

竖直截面 A-A 截面 H_2O 体积浓度分布见图 15(b)。从图中可见,在燃烧器喷口附近气流中 H_2O 浓度较低,炉膛中心 H_2O 浓度达到最大值 17%,与完全燃烧后烟气含 H_2O 浓度理论值 17% 基本一致;随着炉膛高度的增加, H_2O 浓度逐渐降低,分布更加均匀;在炉膛出口处 H_2O 体积平均浓度为 11% 左右。由于过量空气系数($a=1.2$,在实际燃烧中补充了过量的空气),使得在炉膛出口烟气中 H_2O 的体积分数比理论值低。

3 结论

对410t/h六角切圆电站锅炉进行了水煤浆燃烧的试验研究与数值模拟,得到了如下的结论:

(1)水煤浆的燃烧试验表明:该410t/h六角切圆锅炉燃用水煤浆时可以达到100%的额定负荷以实现100%的代油目标,燃烧比较理想,额定工况下燃烧效率为99.7%,锅炉热效率为91.5%。

(2)在燃烧器区域,炉内流场略呈椭圆形,并在1号、4号角方向上存在一定的倾斜,一次风、中心风与水煤浆雾矩发生强烈的动量交换;在燃烧器段,旋转动量矩沿着炉膛高度方向呈线性迅速增加,采用燃尽风布置反切方式后,旋转动量矩增加的趋势被削弱,达到了减少炉内残余扭转的目的。

(3)在水煤浆喷口附近,着火点位于水煤浆雾矩两侧,特别是逆着主气流旋转方向的那一侧,邻角气流补充氧气比较容易,水煤浆颗粒容易着火燃烧,此时温度高达1600K左右;前后墙燃烧器出口附近温度较两侧墙高,且着火位置较两侧墙更靠近壁面;燃烧器区域是整个炉膛中温度最高的地方,但比煤粉锅炉低100~200℃,随着炉膛高度的增加,温度水平不断下降;在前墙火检孔处,数值模拟时该处最高温度约为1707K,与试验测得的最高温度1681K吻合得很好。

(4)水煤浆颗粒运行速度迅速衰减的时间只有毫秒数量级,最终速度与炉内主气流基本一致;在一次风截面上,两侧墙附近水煤浆雾矩挥发分析出速率是前后墙的一半,但挥发分存在的区域较前后墙大一倍左右,由此表明挥发分析出的速度与温度有很大的关系;在前后墙上,挥发分最大析出速率位置距喷口约为0.8m,而两侧墙为1.1m,焦炭燃烧主要发生在挥发分析出后大约0.6m的区域内,六个角焦炭燃烧的速率基本相同,焦炭燃烧主要受扩散过程和动力控制的影响。

(5)对 O_2 、 CO_2 、 NO_x 与 H_2O 等物质的组分场进行了分析发现: O_2 体积浓度随着炉膛高度的增加而增加,在炉膛出口处达到7.1%左右,与试验测得的结果7.54%基本一致; CO_2 体积浓度随着炉膛高度的增加略有降低,在炉膛出口达到10.8%,与试验结果10.5%吻合得较好; NO_x 体积浓度主要集中在高温区,在燃烧风截面附近达到最大值,随着炉膛高度的增加,其浓度有所减少,在炉膛出口处约为332mL/m³,比试验值略高;在燃烧器区域 H_2O 体积浓度达到理论燃烧的最大值17%,随着炉膛高度的增加逐渐减少,在炉膛出口处为11%左右。

本研究分析了410t/h水煤浆电站锅炉炉内的空气动力特性和水煤浆燃烧特性,数值模拟结果与试验数据吻合得较好,为今后大型水煤浆电站锅炉的改造和运行提供了一种有价值的指导作用。

参考文献

- [1] 国家经贸委. 节约和替代燃料油“十五”规划[J]. 节能, 2002, (3): 3-5.
The No.15 layout of economizing and substituting combustible oil[J]. The Nation's Economic and Commercial Committee. Energy Conservation, 2002(3): 3-5(in Chinese).
- [2] 曹欣玉, 翁卫国, 黄镇宇, 等. 白杨河电厂230t/h锅炉燃用水煤浆工业试验[J]. 中国电力, 2001, 34(7): 16-18.
Cao Xinyu, Weng Weiguo, Huang Zhenyu, et al. Industrial test for burning water-coal slurry in 230 t/h boiler of Baiyanghe power plant[J]. Electric Power, 2001, 34(7): 16-18(in Chinese).
- [3] 郑昌浩, 唐庆, 徐旭常, 等. 采用贴体网络对四角切圆锅炉三维等温流场的模拟[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 29-34.
Zheng Changhao, Tang Qing, Xu Xuchang, et al. Numerical modeling of 3-D isothermal flow in tangentially-fired boiler with body-fitted meshes[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 29-34(in Chinese).
- [4] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation[J]. Computers Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [5] 岑可法. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 浙江大学出版社, 1990.
- [6] 于海龙, 赵翔, 周志军, 等. 氧碳原子比和水煤浆质量分数对水煤浆气化影响的数值模拟[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(4): 390-394.
Yu Hailong, Zhao Xiang, Zhou Zhijun, et al. Numerical simulation analysis on the effects of O/C ratio and concentration in coal water slurry on gasification process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, 32(4): 390-394(in Chinese).
- [7] Sivathanu Y R, Faeth G M. Generalized state relationships for scalar properties in non-premixed hydrocarbon/air flames[J]. Combust. Flame, 1990, 82(2): 211-230.
- [8] 黄镇宇, 张传名, 李习臣, 等. 6t/h 撞击式水煤浆喷嘴雾化特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 201-204.
Huang Zhenyu, Zhang Chuanming, Li Xichen, et al. A research on atomization characteristics of 6t/h striking-typed CWS atomizer [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 201-204(in Chinese).
- [9] 潘维, 池作和, 李戈, 等. 四角切圆燃烧锅炉燃烧和污染物排放数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(6): 761-764.
Pan Wei, Chi Zuohe, Li Ge, et al. Numerical simulation of combustion and nitrogen oxides generation process in tangentially fired furnace [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2004, 38(6): 761-764(in Chinese).
- [10] 曹欣玉, 丁宁, 赵凯, 等. 矩形六角燃烧水煤浆锅炉冷态空气动力特性的试验研究[J]. 动力工程, 2004, 24(2): 175-178.
Cao Xinyu, Ding Ning, Zhao Kai, et al. Experimental research on cold aerodynamic characteristic in hexagonal arranged CWS boiler [J]. Power Engineering, 2004, 24(2): 175-178(in Chinese).

收稿日期: 2006-01-25。

作者简介:

丁宁(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事流体力学特性和燃烧特性试验与数值模拟研究, tinin@zju.edu.cn; tininit@163.com。

(编辑 贾瑞君)