

600 MW 超超临界墙式切圆锅炉燃烧过程数值模拟

刘敦禹¹, 秦 明¹, 孙巧群², 吴少华¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:借助计算流体力学软件 Fluent, 选择合理的数学模型, 对一台 600 MW 超超临界墙式布置切圆燃烧锅炉进行数值模拟, 着重研究了墙式切圆锅炉炉内空气动力场, 温度场, 组分场和不同 SOFA(分离燃尽风) 风率对墙式切圆燃烧锅炉 NO_x 生成及烟气成分特性的影响。结果表明: 炉内切圆形成完整, 炉内充满度较好, 但切圆形成过大, 近壁面温度过高, 结渣倾向明显。此结论与实验台上烟雾示踪实验所得结论相符, 证明了模拟的可靠性。随着 SOFA 风率的增加, 主燃区氧浓度降低, 主燃区 NO_x 生成量减少, 在 SOFA 风率过高条件下, 会使燃烧后期 NO_x 生成大大增加, 整体 NO_x 排放并不一定低。因此, 需要合理优化 SOFA 风率。

关 键 词:空气动力场; 温度场; 600 MW 墙式切圆燃烧锅炉; SOFA 风率; NO_x

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

引 言

切圆燃烧锅炉在我国应用极为广泛, 对于四角切圆锅炉已有很多研究, 但对墙式切圆燃烧锅炉的研究则较少, 而且大部分是在小型试验台上进行的^[1~4]。与传统的四角切圆锅炉相比, 墙式切圆锅炉有很多优点, 如燃烧器区域四周壁面热负荷分布均匀、喷口距炉膛中心较短、射流刚性较强、射流两侧补气条件好使射流不易偏斜及稳燃性能好等。因此, 深入研究墙式切圆锅炉燃烧特性, 研发宽煤种适应性, 低排放的大型墙式切圆锅炉具有重要意义。

本研究对某 600 MW 超超临界墙式切圆锅炉炉内过程进行数值模拟, 以为该锅炉的设计和优化运行提供参考。

1 计算域与网格划分

模拟对象为 Π 型布置, 墙式切圆燃烧方式, 采用 PM + MACT 低 NO_x 燃烧技术达到分级燃烧降低 NO_x 目的^[5]。炉膛沿高度方向分为主燃区、还原区和燃尽区。主燃区为主燃烧器区域, 布置有 6 层 PM

燃烧器, 配有 6 台磨煤机, 每台磨煤机向同一层一次风口供粉, 运行时, 最上面一组一次风不投运。在燃烧器顶部有一层紧凑 OFA 喷口。燃烧器区与 SOFA 区域之间为还原区, 在 SOFA 区布置有 4 层喷口, 采用角式布置从 SOFA 区至屏底为燃尽区。主燃烧区采用墙式布置。计算域下至锅炉冷灰斗底部, 上至顶棚, 炉膛高为 65.95 m。炉膛横截面尺寸为 17.666 m × 17.628 m。主燃区假想切圆直径 8.811 m。炉膛结构和燃烧器的布置形式如图 1 所示。

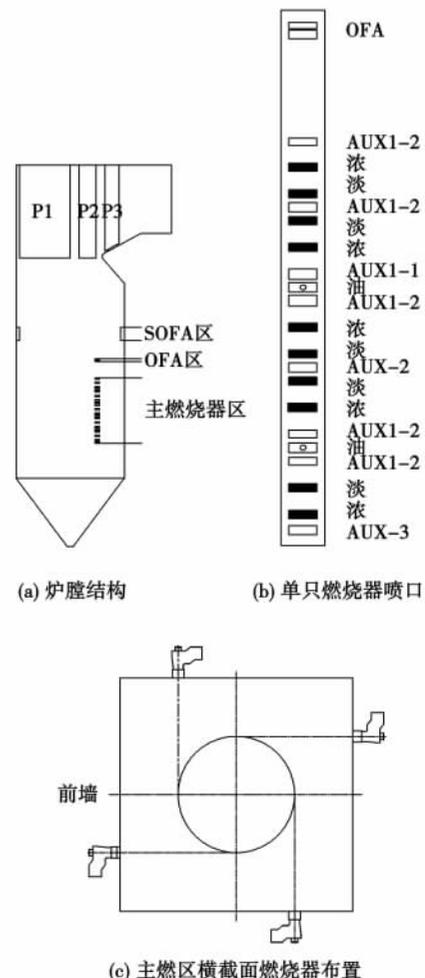


图 1 炉膛结构及单列燃烧器喷口结构简图

收稿日期: 2009-12-31; 修订日期: 2010-06-24

作者简介: 刘敦禹(1984-), 男, 黑龙江尚志人, 哈尔滨工业大学硕士研究生。

网格划分对于燃烧模拟的准确性和收敛性有很大影响,在网格划分的过程中不仅要考虑网格的均匀性,同时要考虑流场的气体流动方向与网格方向的关系。本研究采用的网格如图 2 所示,炉内大部分区域为六面体网格,在过渡区采用四面体网格。在主燃区喷口处局部加密处理,减少伪扩散引起的数值误差^[6-7],炉膛内网格数为 102 万。

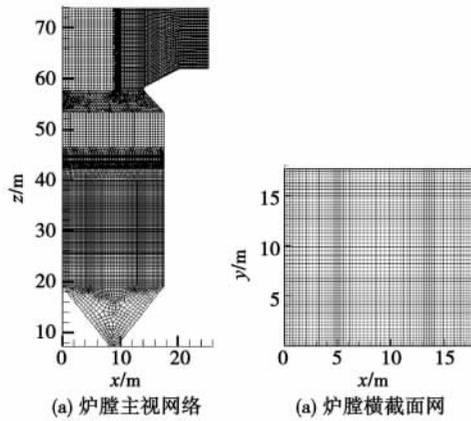


图 2 炉膛网格示意图

2 数学模型及边界条件

数值模拟采用三维稳态算法^[8],利用有限容积法离散微分方程,采用 SIMPLE 算法求解控制方程。气相湍流流动采用 Realizable $\kappa - \epsilon$ 双方程模型^[9],气固两相流动采用拉格朗日随机颗粒轨道模型,辐射传热采用 P-1 模型,气相湍流燃烧采用混合分数法概率密度函数 PDF 模型,挥发分析出采用双步竞争反应模型,焦炭燃烧采用扩散-动力控制燃烧模型^[10-11]。 NO_x 生成采用后处理方法^[12,6],热力型 NO_x 生成采用 Extended Zeldovich 机理,挥发分氮均相反应转化机理选用 De' Soete 模型^[13-15],焦炭氮异相反应转化机理选用 L. D. Smoot 模型,认为固定碳氮首先转化为 HCN,再部分转化为 NO_x ^[16]。

壁面边界条件取无滑移条件,壁面温度根据水冷壁管内的工质温度及管壁热阻定为 694 K,分隔屏的表面温度取为 796 K,后屏表面温度 857 K,末级过热器表面温度为 910 K。辐射受热面黑度取为 0.5,出口条件按充分发展条件取值,给定出口处的外环境压力为大气压,燃烧器入口条件根据锅炉设计值给定^[17]。

3 计算结果分析

3.1 热态工况

煤质的元素分析及工业分析如表 1 所示。SO-FA 风率为 35% 工况下,炉内风量分布情况如表 2 所示。

表 1 燃用煤质的工业分析和元素分析

工业分析/%			元素分析/%							$Q_{\text{net,ar}}$ /MJ · kg ⁻¹
M_{ar}	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}		
10.29	1.53	21.94	33.33	55.63	3.29	7.50	0.86	0.49	22.03	

表 2 炉内风量分配情况

SOFA 风率 35%	
主燃区的总空气量与理论空气量的比值	0.7
OFA 风量与理论空气量的比值	0.056
SOFA 风量与理论空气量的比值	0.419
过量空气系数	1.175

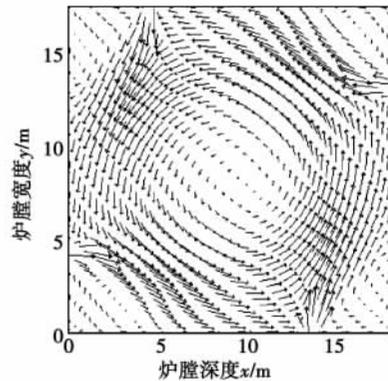


图 3 最上层浓一次风喷口截面速度矢量图

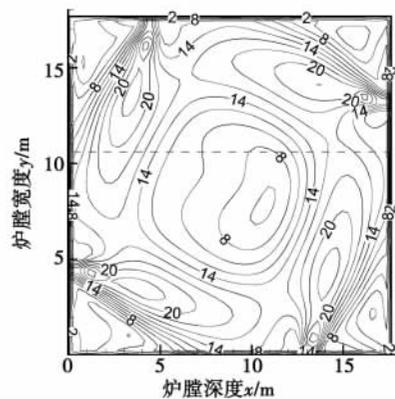


图 4 最上层浓一次风喷口截面速度云图(m/s)

3.2 特征截面空气动力场

由图 3 与图 4 可以看到,炉膛内形成完整的切圆,且位于炉膛中心,切圆较大,炉内气流充满度较好。同时,可以看到炉膛四角处会形成回流区,回流区可以卷吸高温烟气,因此,炉内不会形成死角。由图 4 可以看到射流的刚性较好,并且速度衰减很慢,但气流在壁面处速度也很大,有可能造成气流刷墙。

3.3 温度分布

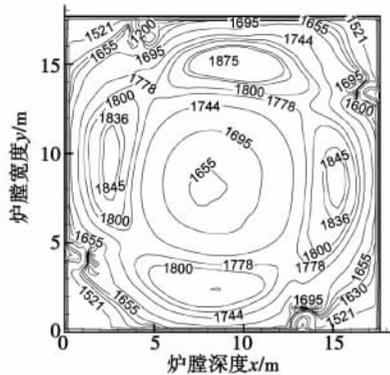


图 5 最上层浓喷口水平截面的温度分布(K)

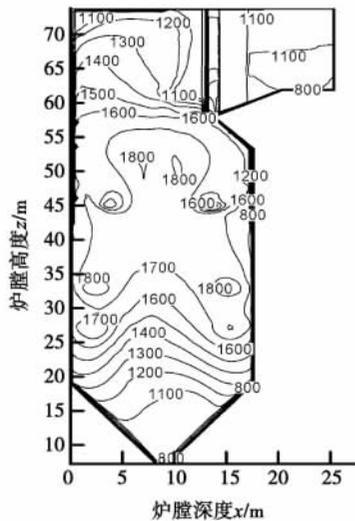


图 6 中心纵截面温度(K)

图 5 和图 6 为炉膛横截面和纵向截面的温度分布。从横截面温度分布可以看出,煤粉气流升温很快,大约在 $y = 2\text{ m}$ 处就达到了 1700 K ,这主要是由于该截面为浓喷口高度所在截面,气流处于过浓燃烧状态,需要的着火热少,气流离开喷口后迅速吸收热量使挥发分析出并着火,而后焦炭着火释放大量的热量,气流温度升高。同时,可以看到横截面上存

在 4 个高温区,而且这 4 个高温区都集中在壁面附近。这一方面是由于上游射流的冲击作用使气流偏斜;另一方面,燃烧器喷口距离炉墙过近,假想切圆很大,温度升高后,气流膨胀的作用使得热态切圆增加。两种因素共同作用使得在壁面附近形成高温区。壁面附近甚至有高于 1573 K 的高温区。从中心纵向截面温度分布来看,火焰形状饱满,充满度好,烟气温度在 1300 K 以上所占的区域大约占折焰角以下 $3/5$ 的区域,煤粉在高温条件下停留时间长,燃尽充分。在炉膛上部辐射屏区由于受到高温辐射过热器的吸热作用,烟气温度逐渐下降至 1273 K 左右。模拟得到的炉膛出口(分隔屏下部)平均温度为 1595 K ,与设计值 1593 K 基本符合。进入水平烟道的烟气温度适中,可以避免出现高温过热器结渣或超温的问题。

3.4 氧气浓度分布

由图 7 可以看出,沿着射流方向,在喷口附近,氧气浓度很快降低,表明燃料中的挥发分很快析出并着火燃烧,说明所用煤种属于易燃煤,而后随着二次风的混入,氧气有所增加。因此,沿着射流方向,氧气浓度呈现先降低后增加的趋势。而且该截面处的总体氧浓度不高,大部分不超过 1% ,说明处于还原性气氛下。另外。在壁面附近氧浓度很低,远小于 1% ,氧浓度降低会使灰熔点降低,更容易结渣。

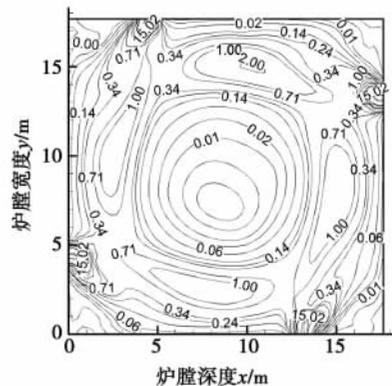


图 7 最上层浓喷口水平截面的氧气浓度(体积百分比)分布

3.5 SOFA 风率对燃烧过程的影响

SOFA 风率是空气分级燃烧技术的关键参数,对降低 NO_x 排放有决定性影响,选取 SOFA 风率为 35% 、 25% 和 15% 的 3 种工况来研究 SOFA 风率对于燃烧过程的影响。改变 SOFA 风率后的风量分配情况如表 3 所示。

表 3 改变 SOFA 风量后炉内风量分配情况

	SOFA 风率/%	
	25	15
主燃区的总空气量与理论空气量的比值	0.807	
OFA 风量与理论空气量的比值	0.071	
SOFA 风量与理论空气量的比值	0.297	
过量空气系数	1.175	

从图 8 的温度分布可以看出,3 种 SOFA 风率情况下,温度变化的分布是相似的,在主燃烧器区,由于煤粉的燃烧释放热量,温度迅速升高;进入还原区由于空气送入,燃烧放热速度减缓,因而温度降低;在 SOFA 区由于大量空气的送入使得温度迅速降低;而在燃尽区,主燃区未完全燃烧产物和剩余焦炭在大量氧气补充下剧烈燃烧放出热量,因而烟气温度又迅速上升,完成燃尽阶段。计算表明,SOFA 风率越大,燃尽区的烟气温升越明显,并使炉膛出口烟温升高,表明燃料在该区域的燃烧份额也越大;同时,SOFA 风率越大时,主燃区燃料的燃烧份额相应减少,温度水平也较低。

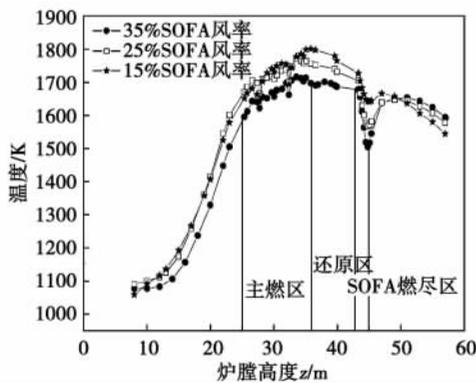


图 8 温度随高度分布

O₂ 浓度沿高度分布情况如图 9 所示。在主燃区以下,SOFA 风率为 15% 时主燃区的氧气浓度远远大于 SOFA 风率为 35% 和 25% 时的主燃区氧气浓度。同时,在主燃区和还原区截面氧气浓度有两个主要峰值,这两个主要峰值是由于燃烧器的特殊布置产生的。氧气浓度的峰值产生在三层二次风集中喷入的高度附近,二次风的集中喷入会产生局部富氧燃烧,因此氧气浓度迅速增加,但随着燃烧的进行,氧气又被迅速消耗,因此浓度又剧烈降低。在 SOFA 区氧气浓度也呈现先迅速上升,而后又迅速下降得趋势。但是炉膛出口氧气浓度并不是随着 SOFA 风率下降而单调下降。计算结果显示,在 SO-

FA 风率为 25% 工况下,炉膛出口的氧气浓度最低,说明此时 SOFA 风与剩余未燃尽燃料的混合更充分,反映了燃尽效果更好,而其余两个工况的混合或燃尽效果相对较差。

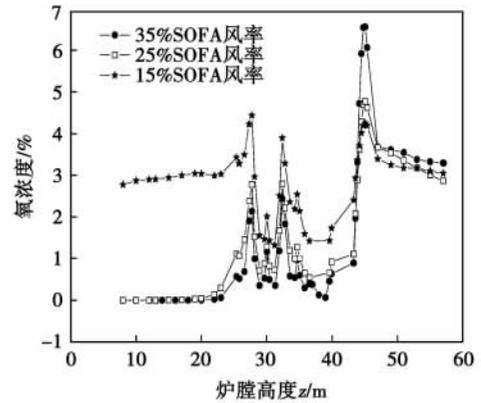


图 9 O₂ 浓度(体积百分比)随高度的分布

CO 浓度分布由图 10 可以看出,SOFA 风率增大,使主燃烧器区风率减小,产生的 CO 浓度相应的增加。但在 SOFA 的上部,各工况的 CO 浓度值都降到很低。

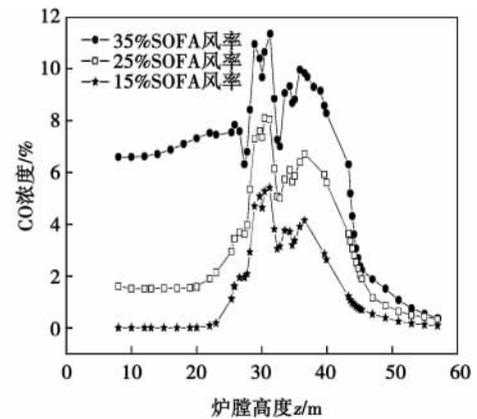


图 10 CO 浓度(体积百分比)随高度的分布

由图 11 可以看出 SOFA 风率为 15% 条件下,主燃区由于燃烧剧烈形成大量的燃料型 NO_x 和部分热力型 NO_x,因此,主燃区 NO_x 的浓度远远要高于其它两工况。基本规律为:主燃区氧浓度越高,NO_x 浓度越高。在 SOFA 区域,由于大量 SOFA 风的喷入,使 NO_x 浓度先降低,而后由于煤粉的进一步燃烧又产生了一部分燃料型 NO_x,使得 NO_x 浓度升高,而且在燃尽区 NO_x 浓度的升高值与 SOFA 风率是成正比的。由文献 [16, 18] 可知,在此区域焦炭燃烧时释放出来的 N 先转化为 HCN,在氧气浓度充足下会转化为 NO_x,而同时 HCN 又会与 NO_x 反应

生成 N_2 。由图 11 可见,在燃尽区,SOFA 风率为 35% 时, NO_x 浓度呈单调增加,说明其生成反应大于还原反应;而 SOFA 风率为 25% 和 15% 时, NO_x 浓度先上升、后有所降低,表明 NO_x 还原反应大于生成反应。

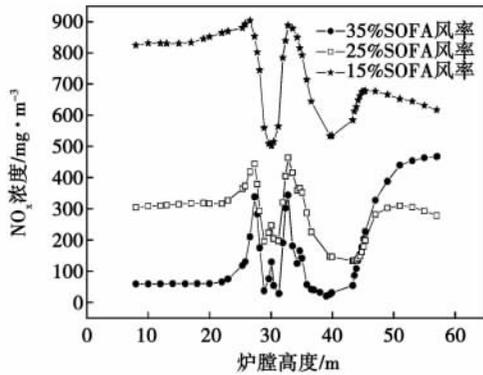


图 11 NO_x 浓度随高度分布

由计算可知:SOFA 风率为 25% 时,炉膛出口氧气浓度为 2.9%,炉膛出口 NO_x 浓度为 14.12% (折算到 6% 氧量下的 NO_x 排放量为 240 mg/m^3);SOFA 风率为 15% 时炉膛出口氧气浓度为 3%,炉膛出口 NO_x 浓度为 30.85% (换算到出口氧气浓度为 6% 时, NO_x 的排放量为 528 mg/m^3)。

因此,深度分级条件下,不一定会获得较低的 NO_x 排放。选择合理的 SOFA 风率是十分必要的,本研究得到的最佳 SOFA 风率为 25%,为工程实际选择 SOFA 风率提供理论依据。

4 结 论

(1) 由空气动力场和温度分布可知,该墙式切圆锅炉在设计条件下,炉内切圆形成良好,充满度高,炉膛内部不存在温度较低区域,炉内燃尽程度高。

(2) 综合速度分布、氧浓度分布和温度分布可知:一次风截面贴墙风速较高,近壁面区域烟气温度较高,氧浓度较低。结合 3 种因素可知该锅炉的燃烧器布置方式使炉内结渣倾向明显。同时,射流喷出后很快向侧墙偏斜。这一点与热态模拟结论相同,验证了模拟的可靠性。考虑结渣倾向问题,建议采用减小假想切圆直径、增加一次风率的方法来改善贴壁风速过高的状况。

(3) SOFA 风率升高炉内温度分布趋于均匀;炉膛出口 NO_x 浓度并不是随着 SOFA 风率的增大

而单调减小。SOFA 风率为 25% 条件下, NO_x 浓度值最小。因此,在深度分级条件下,用模拟方法选择合理的 SOFA 风率对于指导实践有很深的意义。

参考文献:

- [1] 谭厚章,余战英,徐通模,等. 四墙切圆布置燃烧器炉内实际切圆大小的试验研究[J]. 热能动力工程,2004,19(2):158-166.
- [2] 林秀军,张强. 四墙切圆煤粉炉内燃烧过程数值模拟研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2005,37(4):463-464.
- [3] 林秀军. 四墙切圆煤粉燃烧室内湍流气固两相流动与燃烧数值模拟的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
- [4] 谭厚章,徐通模,余战英. 四墙切圆燃烧方式壁面热负荷分布试验研究[J]. 工程热物理学报,2000,21(4):525-526.
- [5] 樊泉桂. 超临界和超超临界锅炉煤粉燃烧新技术分析[J]. 电力设备,2006,7(2):24-25.
- [6] 向军,熊友辉,郑楚光,等. PDF-Arrhenius 方法模拟煤粉燃烧氮氧化物生成[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):156-160.
- [7] 李永华,陈鸿伟,刘吉臻,等. 煤粉燃烧排放特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):166-169.
- [8] 梁晓宏,樊建人,岑可法. W 型火焰煤粉锅炉炉内三维流动和燃烧过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报,1997,17(7):243-247.
- [9] SHIH T H, LIU 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.
- [10] CHUNGEN YIN, SEBASTIEN CAILLAT, HARIION JEAN LUC, et al. Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609 MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2002, 81(5):997-1006.
- [11] 林鹏云,罗永浩,胡璠元. 燃煤电站锅炉 NO_x 排放影响因素的数值模拟分析[J]. 热能动力工程,2007,22(5):529-533.
- [12] 刘忠,阎维平,高正阳,等. 超细煤粉的细度对再燃还原 NO 的影响[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):204-208.
- [13] THOMAS LE BRIS, FRANCISCO CADAVID, SEBASTIEN CAILLAT, et al. Coal combustion modeling of large power plant, for NO_x abatement[J]. Fuel, 2007, 86(9):2213-2220.
- [14] 曹庆喜,吴少华,刘辉. 采用选择性非催化还原脱硝技术的 600 MW 超超临界锅炉炉内过程的数值模拟[J]. 动力工程,2008,28(3):350-351.
- [15] 潘维,池作和,斯东波,等. 200 MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2005,25(8):110-115.
- [16] SMOOT L D, SMITH P J. NO_x Pollutant formation in a turbulent coal system//Coal Combustion and Gasification [C]. NY: Plenum Press, 1985. 91-95.
- [17] 申春梅,孙锐,吴少华. 超超临界锅炉炉内燃烧过程的数值模拟[J]. 动力工程,2006,26(1):32-37.
- [18] 董海梅,张晓辉,孙锐,等. 立体分级低 NO_x 燃烧系统数值模拟[J]. 节能技术,2008,26(4):307-308.

510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). - 79 ~ 83

With the highest net power generation efficiency and systematic exergy efficiency serving as the targets respectively and through a thermodynamic analysis, determined were two principles for choosing a working medium for a power generation system with different types of waste heat: for waste heat with a constant heat flux, a working medium with a relatively high critical temperature should be chosen and for waste heat with a constant initial temperature and mass flow rate, a working medium with a relatively low critical temperature should be chosen. Moreover, the main parameters α and β for evaluating an optimal working medium for a corresponding type of waste heat were defined and the working medium with bigger values enjoys a better performance. With a two-stage flue gas waste heat power generation system serving as an example, the Aspen Plus software was used to simulate, calculate and verify the theoretically analytic results. The research results show that the variation tendency of the net power, parameter α and exergy loss of different working media in the first stage of the system with the evaporation temperature fully corresponds to the theoretically analytic results and so does that of the net power, parameter β and exergy loss of different working media in the second stage of the system. This indicates that the principles and methods for choosing an optimal working medium being proposed by the authors are correct and feasible. **Key words:** waste heat power generation, working medium with a low boiling point, index for evaluating a work medium, thermodynamic analysis, flow path simulation

分级进风旋流燃烧室内湍流燃烧的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Turbulent Flow Combustion in a Staged Air Swirling-flow Combustor** [刊,汉] CHEN Ying, ZHANG Jian (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). - 84 ~ 88

By adopting the turbulent flow combustion model of an algebraic second-order moment-probability density function (PDF), which has taken into account the interaction of the turbulent flow-chemical reactions, a numerical simulation was performed of the methane turbulent flow combustion under two groups of operating regimes in a staged-air swirling-flow combustor. The distribution of the mean square root values of carbon dioxide concentration and gas axial pulsation speed being obtained corresponds to the test data. Basically so do the air axial and tangential speed, correlation value of the axial-tangential pulsation speed as well as the distribution of the temperature and oxygen concentration. The research results show that to choose a proper secondary air ratio can play a role of optimizing the combustion process. **Key words:** staged air admission, turbulent flow combustion, swirling flow combustor, algebraic second-order moment-probability density function (PDF) turbulent flow combustion model, air speed, component concentration

600 MW 超超临界墙式切圆锅炉燃烧过程数值模拟 = **Numerical Simulation of the Combustion Process of a 600 MW Ultra-supercritical Wall Type Tangentially-fired Boiler** [刊,汉] LIU Dun-yu, QIN Ming, WU Shao-hua (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), SUN Qiao-qun (College of Astronautics and Architectural Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). -

89 ~ 93

With the help of CFD (computational fluid dynamics) software Fluent and by choosing a rational mathematical model, a numerical simulation was performed of a 600 MW ultra-supercritical wall-type-arranged tangentially-fired boiler. The influence of the aerodynamic field, temperature field, component field and different SOFA (separated over-fired air) air ratios on the NO_x generation and flue gas constituent characteristics of the boiler in question were mainly studied. The research results show that the in-furnace tangential circle is completely formed with a relatively good filling degree, but the tangential circle being formed is excessively large, the temperature nearing the wall surfaces is unduly high and the slagging tendency is conspicuous. Such a conclusion is in good agreement with that obtained from the fog tracer test performed on a test stand, having proved that the simulation is reliable. With an increase of the SOFA air ratio, the oxygen concentration in the main combustion zone will decrease and NO_x produced in the main combustion zone will also diminish. Under the condition of the SOFA air ratio being excessively high, the NO_x produced in the later-stage combustion will increase greatly and the NO_x emissions will not be necessarily low as a whole. Therefore, it will be necessary to rationally optimize the SOFA air ratio. **Key words:** wall type tangentially-fired boiler, NO_x , SOFA (separated over-fired air) air ratio

船用增压锅炉热平衡及热损失的计算方法 = **Method for Calculating the Heat Balance and Thermal Loss of a Marine Turbocharged Boiler** [刊, 汉] WANG Yong-tang, WU Shao-hua (College of Energy Science and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Ming, WANG Jian-zhi (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). - 94 ~ 96

Heat balance calculation is crucial for calculating the thermodynamic performance of a marine turbo-charged boiler. By performing an analysis and explanation in the light of the structural and operation features of a turbocharged boiler with its turbocharged unit doing work, the authors have proposed a method for calculating the heat balance and thermal loss of a marine turbocharged boiler with the heat absorbed by the air interlayer being taken into account, presented a formula for calculating the heat entered into the furnace and various losses, especially the thermal loss and heat isolation coefficient of the turbocharged unit and performed a thermodynamic check calculation of the turbocharged boiler with or without the influence of the air interlayer. The calculated results approximate to the actual conditions. The calculation method being proposed by the authors can provide reference for thermodynamic performance calculation of marine turbocharged boilers. **Key words:** marine turbocharged boiler, heat balance, air interlayer, heat dominated, heat dissipation loss

基于最小二乘支持向量机的煤粉着火温度预测分析 = **Prediction and Analysis of Pulverized Coal Ignition Temperature Based on a Least Square Supportive Vector Machine** [刊, 汉] CHANG Ai-ying, WU Tie-jun, ZHAO Hong, et al (National Key Laboratory on Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1). - 97 ~ 99

In the light of the problem relating to the economic and safe operation of a boiler that it is difficult to predict the ig-