

旋流对高温空气燃烧影响的模拟研究

苏亚欣, 汪文辉, 邓文义

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘 要:以工业炉的高温空气燃烧技术应用为背景, 对一个同心式轴向旋流高温空气燃烧器单烧嘴燃烧室内的高温空气燃烧特性进行了模拟研究。湍流输运方程采用 RSM 模型, 气相燃烧模型采用函数的 PDF 燃烧模型, 辐射换热过程采用离散坐标法模拟, NO_x 模型为热力型。以天然气为燃料, 在预热空气温度为 1 273 K 空气含氧量为 8%。燃烧总过量空气系数为 1.1 的条件下, 进行了数值模拟计算, 讨论了旋流角度和燃烧器的螺旋伸展长度等参数对 NO_x 排放、局部温度、氧浓度和 CO 浓度分布等的影响。结果表明, 旋流燃烧器能进一步降低 NO 排放, 使燃烧更加完全。当螺旋肋片伸展因子 $R=2$ 燃料/空气速度比 $a=1.09$ 旋流角度 $\theta=180^\circ$ 时, NO 排放浓度最小, 出口 NO 的摩尔分数为 12.9×10^{-6} , 出口 CO 的摩尔分数为 29×10^{-6} 。而当旋流角度 $\theta=0^\circ$ 时 (直射流), 出口 NO 的摩尔分数为 31.7×10^{-6} , 出口 CO 的摩尔分数为 372×10^{-6} 。

关 键 词: 工业炉; 高温空气燃烧; 旋流燃烧器

中图分类号: TK223.23 TF055 文献标识码: A

引 言

高温空气燃烧 (High Temperature Air Combustion) 近年来在工业加热领域得到了快速的发展, 它通过高效蓄热设备回收烟气的显热, 把燃烧所需的空气预热到接近燃料的燃点, 同时最大程度地降低燃烧空气中的氧气浓度, 在保证燃烧稳定的前提下, 大幅度地实现了节能和降低热力型 NO_x 排放的目的。高温空气燃烧的火焰稳定性、燃烧室内的温度分布均匀性以及 NO_x 排放特性等都与燃烧室内的燃料、空气、烟气的混合过程紧密相关。文献 [1~6] 的实验研究及数值模拟结果表明, 当改变燃料和预热空气的喷入位置和喷入条件时, 即改变它们的混合过程, 炉内燃烧气体回流将影响并改变反应区氧的浓度和火焰温度, 从而影响热力型 NO_x 的生成。

目前, 应用高温空气燃烧技术的工业炉在实验室研究以及工程应用中, 其燃烧器结构都是直射流结构, 即高温预热空气和燃料都是以直射流的方式, 按不同排列方式、尺寸和燃烧条件等高速喷入炉膛, 在炉膛内引起局部烟气回流和烟气、空气以及燃料之间的混合和燃烧反应^[1~6]。直射流引起的炉内的回流范围和程度比较有限, 相比而言, 旋流能够起到更好地混合作用。旋流能够有效强化高温燃烧产物和未燃烧燃料在回流区的混合过程, 并形成稳定的点火源和活化中心, 从而使火焰稳定^[7]。旋流式燃烧在煤粉、气体富氧燃烧以及燃气轮机等不同领域得到了应用, 在降低 NO 排放或稳定燃烧方面效果明显^[8~12]。由此, 文中提出了一种同心式轴向旋流高温空气燃烧器^[13]。在同心式旋流燃烧器喷嘴结构中, 外层为几股旋流高温预热空气射流, 中心为燃气直射流, 它们在进入炉膛后, 多股旋流射流包围一股直射流, 在炉膛的有限空间内能够实现比直射流更充分的混合, 从而实现更好的稳定燃烧和更低的 NO_x 排放。

利用计算流体力学模拟方法, 研究同心式轴向旋流高温空气燃烧器喷嘴的射流参数对燃烧室内高温空气燃烧特性的影响特点。

1 模 型

1.1 燃烧器模型

本研究模拟的燃烧室尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 如图 1 所示。燃料通过位于燃烧室侧墙中心的圆形喷口以直射流高速喷入燃烧室, 预热高温空气通过燃料射流外圈的轴向螺旋通道以旋流方式喷入燃烧室。旋流燃烧器的结构如图 2 所示。预热高温空气旋转通道由 3 条螺旋肋片沿轴向按一定螺旋角度 θ 和一定的螺旋伸展因子 $R (R= L/H, L$

收稿日期: 2010-06-29 修订日期: 2010-09-08

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目 (11ZR1401000)

作者简介: 苏亚欣 (1972-), 男, 东华大学副教授, 博士。

为螺旋肋片的轴向长度, H为螺旋肋片高度) 旋转布置于中心圆形直通管与外层套管之间。螺旋角度

θ 为螺旋肋片与燃烧器中心轴线的夹角。

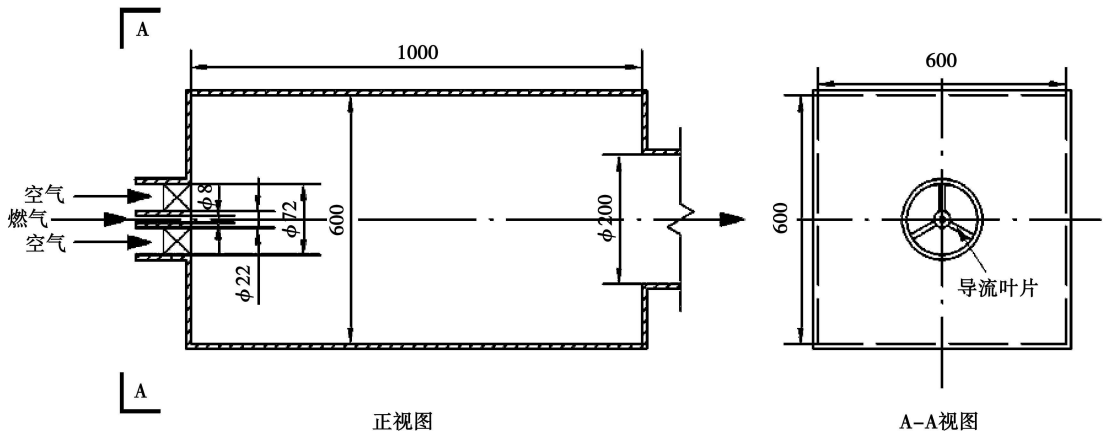


图 1 燃烧室模型结构 (mm)

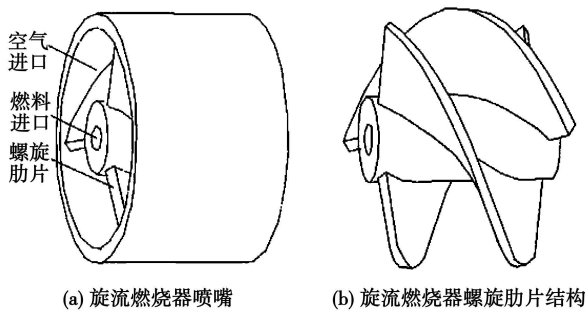


图 2 旋流燃烧器结构

1.2 计算模型与方法

NO_x 的生成机理包括热力型、快速型和燃料型。由于天然气中不含氮,因此在 NO 生成模型中不考虑燃料型 NO_x 。采用扩大的 Zeldovich热力型 NO_x 和快速型 NO_x 。研究的高温空气燃烧过程为气相湍流扩散燃烧,采用 β 函数形式的 PDF燃烧模型,与燃烧相耦合的湍流输运模型采用适用于各向异性的 Reynolds应力模型 (RSM)。燃烧室内的辐射传热模型采用离散坐标法 (以上模型方程略去,可参考有关文献)。

对方程采用二阶迎风差分格式离散,采用 SIMPLE算法求解。整个计算域网格总数为 21万,网格类型均为六面体。应用 Fluent 6.3对上述模型进行了计算。

在保持肋片的螺旋伸展因子 $R=2$ 不变的情况下,为了探索进口空气射流形式对高温空气燃烧过程的影响,对当肋片螺旋角度 θ 为 0° (直射流)、 90° 、 180° 、 270° 时的燃烧特性进行了模拟,重点比较

了 θ 为 0° 与 180° 时的工况。在计算中,燃料流量为 $5.6 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$,进口温度为 300 K 。空气流量为 0.29 kg/s ,预热温度为 1273 K 。空气含氧量为 8% 。燃烧总过量空气系数为 1.1 。底部壁面的散热边界条件为恒定热流,大小为 28580 W/m^2 ,用以模拟炉膛的热负荷,其余壁面均设为绝热。模拟用燃料成分如表 1所示。

表 1 天然气成分燃料为城市天然气

燃气成分	体积分数 /%
CH_4	90.26
C_2H_6	3.98
C_3H_8	1.93
CO_2	0.48
N_2	3.35

2 结果讨论

2.1 数值模型的验证

文献 [14]通过实验测试了一个 580 kW 的尺寸为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 6.25 \text{ m}$ 的燃烧室内天然气的高温空气燃烧特性,该炉的喷嘴具有 4个直射流燃气喷口环绕一个位于中心的高温空气直射流喷口。首先利用本文提到的数值模型和计算方法模拟了文献 [14]的实验工况,并将模拟结果与文献 [14]的试验结果进行了对比,图 3给出了燃烧室 $Y=0 \text{ m}$ 平面,长度方向 $X=0.15 \text{ m}$ 处 NO_x 浓度沿燃烧室径向距离的变化情况。从结果的比较可以看到,计算结果

与文献的试验结果具有较好的一致性。

2.2 旋流对 NO_x排放的影响

在保持肋片的螺旋伸展因子 $R=2$ 不变的情况下, 对燃料和空气速度比 α ($\alpha = v_f/v_a$) 分别为 0.56、0.73、1.09 旋转角度 θ 为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 时的燃烧特性进行了模拟。图 4 为不同的旋转角度 θ 和燃料、空气速度比 α 时 NO_x 的排放浓度。可以看出, NO_x 的生成浓度随着旋转角度 θ 的增加先减小, 后增大; 同时随着燃料与空气的速度比 α 的增大而降低。它表明空气采用旋转射流 ($\theta > 0^\circ$) 与直射流 ($\theta = 0^\circ$) 相比, NO_x 的生成浓度显著降低。当 $\alpha = 1.09$ 和 $\theta = 180^\circ$ 时 NO_x 的生成浓度最低。

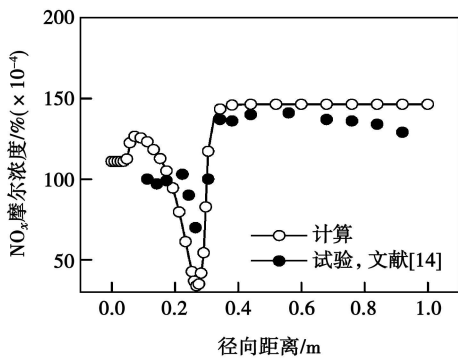


图 3 NO_x体积浓度沿径向距离的变化 (Y=0 m, X=0.15 m)

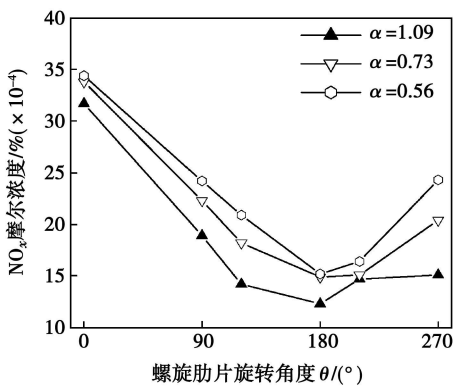


图 4 旋转角度 θ 和 α 对 NO_x排放浓度的影响

为进一步研究在相同的旋转角度条件下, 燃烧器的螺旋伸展长度对旋流燃烧特性的影响, 保持 $\theta = 180^\circ$, 燃料和空气的速度比 $\alpha = 1.09$ 其它条件不变, 对不同的螺旋伸展因子 R 时的 NO_x 排放进行了计算, 结果如图 5 所示。当其它参数条件一定时, NO_x 的排放量随 R 的增大先减小后增大, 在 $R = 2 \sim 2.5$ 时有最小值。这主要是由于随着肋片伸展长

度的增加, 螺旋肋片对空气流导流后的旋流效果逐渐降低, 当 R 趋近于无穷大时, 就等同于空气流直射流的情景。因此, 在选用螺旋肋片导流空气流时, 要这各个方面的因素, 合理选用肋片的结构参数, 以达到最佳的优化效果。

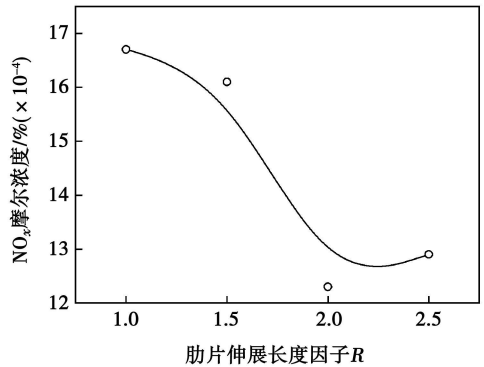
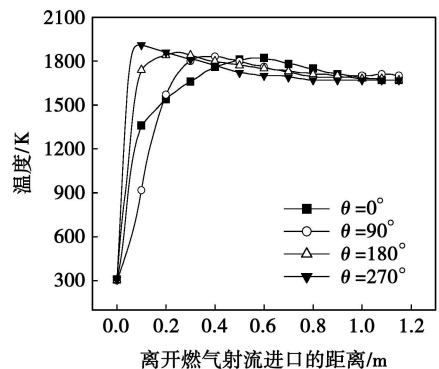
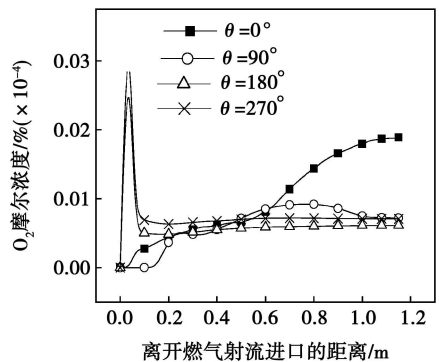


图 5 肋片伸展因子 R 对 NO_x排放的影响



(a) 燃气射流轴线上的温度分布



(b) 燃气射流轴线上的 O₂ 摩尔分数分布

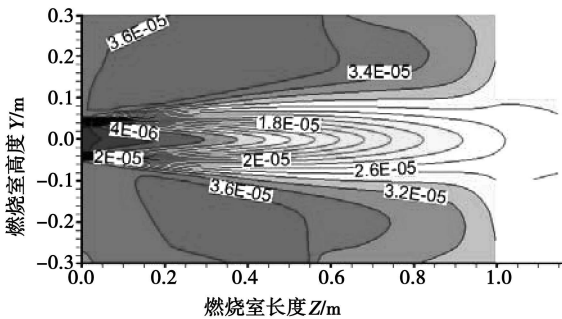
图 6 燃气射流轴线上的温度及 O₂ 摩尔分数的分布

2.3 旋流对燃烧室内氧浓度和温度分布的影响

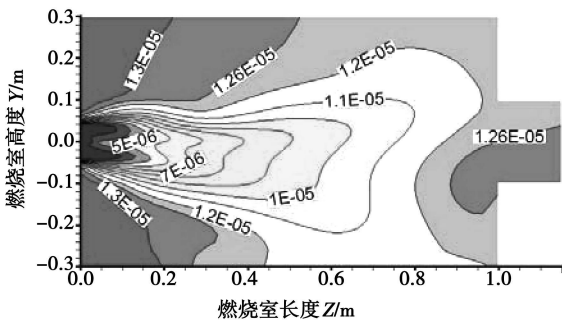
热力型 NO_x 的生成取决于局部温度和氧浓度。旋流燃烧器将强化燃烧室内的混合过程, 改变局部

的燃料和氧的浓度分布,从而影响燃烧过程,影响局部温度和 NO_x的生成。

图 6 (a)为燃烧室内沿燃气射流轴线方向中心线上的温度分布,图 6 (b)为燃气射流轴线方向中心线上氧气摩尔分数的分布,计算条件为 R=2 a=1.09 其它条件不变。当采用高温空气旋流射流时,旋流使得燃气射流进口处的氧浓度增大,燃料在一进入燃烧室后就开始迅速燃烧,提高了进口附近的温度,燃烧室后半部分的氧浓度分布远远低于直射流时。进口空气采用旋流,使得室内回流区区域增大,让更多的燃烧后的高温烟气与燃料、氧进行混合,这样会加快了室内氧浓度的下降速度,低氧区域也随之得以扩大。燃烧室内较大低氧区域的存在,会使得燃料在贫氧氛围下燃烧,从而有效抑制 NO_x的生成。图 7 给出了此时燃烧室中心平面局部 NO_x的分布,可见,旋流 $\theta=180^\circ$ 时燃烧室绝大部分区域的 NO_x生成浓度均小于直射流 $\theta=0^\circ$ 时。



(a) 螺旋角为0°时局部NO_x分布



(b) 螺旋角为180°时局部NO_x分布

图 7 螺旋角度为 0°和 180°时局部 NO_x分布

表 2 给出了在不同的旋流情况下整个燃烧室内的平均温度和最高温度的计算结果。旋流使燃烧室内的平均温度和最高温度都增加了,这是由于高温空气采用旋流时,燃烧室内各组份的混合更加充分,延缓了燃料的燃烧放热过程,同时高温烟气的回流使炉膛温度变得均匀,扩大燃烧区域,说明旋流强化了燃烧室内的燃烧过程。局部温度场的计算结果表明,旋流使炉内的最高温度区域缩小且移向进口附近,火焰长度缩短,宽度增大,火焰体积度增大。

当旋流角度 $\theta=270^\circ$ 时,由于旋流强化了燃烧过程,使得燃烧室内的温度过高,而燃烧室内的局部氧浓度分布与旋流角度较小时相差不大,反而使热力型 NO_x的生成因温度的因素而增加,即图 4 中 NO_x在 $\theta=180^\circ$ 以后又随旋流角度的增加而增大。

2.4 旋流对燃烧室内 CO分布的影响

图 8 给出了燃烧室内燃气射流轴线上的 CO分布,计算条件为 R=2 a=1.09 其它条件不变。预热空气旋流角度 θ 不同时,燃气喷口轴线上的 CO摩尔分数在炉膛的前半部先增大到最大值,然后逐渐减小到零。当空气采用直射流时,轴线上炉膛的前半部 CO摩尔分数最大,说明这里的燃烧不完全。随着预热空气旋流角度的增加,CO的浓度迅速减小,说明燃烧得到了强化,燃烧得较完全。这说明预热空气采用旋流后,旋流使得燃料、空气的混合得到了增强,促进了燃烧过程。表 3 中 CO的计算结果表明旋流使得燃料的燃烧更加完全,提高了燃料的利用率。

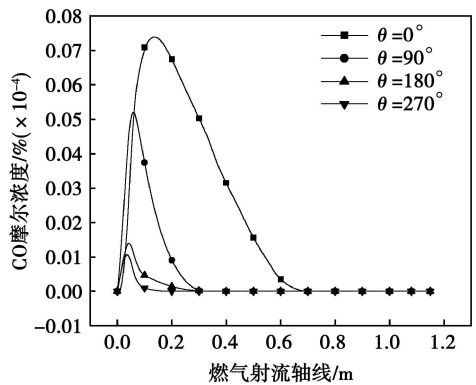


图 8 燃气射流轴线上的 CO分布

表 2 旋流角度对温度场和 CO摩尔分数的影响

	$\theta=0^\circ$	$\theta=90^\circ$	$\theta=180^\circ$	$\theta=270^\circ$
燃烧室内最高温度 /K	1 876	1 894	1 914	1 933
燃烧室内平均温度 /K	1 575	1 604	1 633	1 660
出口 CO摩尔分数 % ($\times 10^{-4}$)	372	187	29	21

3 结 论

以工业炉的高温空气燃烧技术应用为背景,对一个同心式轴向旋流高温空气燃烧器单烧嘴燃烧室

内的高温空气燃烧特性进行了模拟研究。结果表明, 旋流燃烧器能进一步降低 NO 排放, 使燃烧更加完全。 NO 排放浓度随旋流角度和螺旋伸展长度的增加先减小到最小值, 然后又增大。当螺旋肋片伸展因子 $R=2$ 燃料/空气速度比 $a=1.09$ 旋流角度 $\theta=180^\circ$ 时, NO 排放浓度最小, 出口 NO 的摩尔分数为 12.9×10^{-6} , 出口 CO 的摩尔分数为 29×10^{-6} 。而当旋流角度 $\theta=0^\circ$ 时 (直射流), 出口 NO 的摩尔分数为 31.7×10^{-6} , 出口 CO 的摩尔分数为 372×10^{-6} 。

参考文献:

- [1] CHOI GYUNG MIN, MASASHI KATSUKI. Advanced low NO_x combustion using highly preheated air [J]. *Energy Convers. Mgmt.* 2001, 42: 639-652.
- [2] 朱彤, 朱尚龙, 曹甄俊, 等. 高温空气燃烧 NO_x 排放特性的试验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(5): 894-896.
- [3] 王力军, 蔡九菊, 邹宗树, 等. 燃气喷射对高温空气燃烧室内流动影响的数值研究 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2003, 24(3): 276-279.
- [4] WU SENG RUNG, CHANGWEN CHEN, CHIAO JACK. Low NO_x heavy fuel oil combustion with high temperature air [J]. *Fuel* 2007, 86(5-6): 820-828.
- [5] ZHANG HAI YUE, GUANGXI LU, JUNFU et al. Development of high temperature air combustion technology in pulverized fossil fuel fired boilers [J]. *Proceedings of the Combustion Institute* 2007, 31: 2779-2785.
- [6] LILLE SIMON, BLASIAK WLODZIMERZ, JBWARTOW SKIMARCYN. Experimental study of the fuel jet combustion in high temperature and low oxygen content exhaust gases [J]. *Energy* 2005, 30: 373-384.
- [7] SHENDI MOST, JIM JOULAN P et al. The effect of initial conditions for swirl tubular diffusion flame with a stratified exit burner [J]. *Combustion Science Technology* 1994, 100: 203-224.
- [8] 张永生, 穆克进, 张哲颀, 等. 同向和反向合成气旋流扩散燃烧研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(14): 63-68.
- [9] SIEVAN N, VUKMAN B, SMEON Q et al. Experimental and numerical investigation of gaseous fuel combustion in swirl chamber [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2005, 48(21-22): 4623-4632.
- [10] 徐采松, 胡元, 罗永浩. 旋流燃烧室内分级进风对燃烧污染物生成的影响 [J]. *动力工程*, 2009, 29(5): 445-450.
- [11] 赵黛青, 杨浩林, 杨卫斌. 旋流对同轴富氧扩散燃烧 NO_x 排放的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2008, 14(5): 383-387.
- [12] 陈伟鹏, 赵增武, 邢守正, 等. 燃气炉内旋流强度对 NO_x 生成特性的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 2008, 20(1): 6-9.
- [13] 苏亚欣, 汪文辉. 工业炉高温空气燃烧技术的同心式轴向旋流燃烧器 [P]. 中国实用新型专利, 专利号: 200920073328.0, 2010.9.15.
- [14] MANCINI M, WEBER R, BOLLETTINI U. Predicting NO_x emissions of a burner operated in flameless oxidation mode [J]. *Proceedings of the Combustion Institute* 2002, 29: 1155-1158.

(编辑 陈滨)

新技术、新工艺

中石油为西气东输三线增订 3 台涡轮压缩机成套装置

据《Gas Turbine World》2010 年 5~6 月号报道, 中石油公司从英国 Rolls-Royce 公司订购了 3 台 RB211 燃气轮机压缩机成套装置, 用于连接中国西部到北京的西气东输项目的天然气输送管线的延伸段。

除了驱动西气东输项目管线的一线 and 二线压缩机站的 RB211 装置以外, Rolls-Royce 公司现在还将供应 3 台装置, 用于陕西—北京的西气东输三线工程。

3 台由 RB211 燃气轮机驱动的涡轮压缩机成套装置将安装在陕西省榆林市建造的压缩机站内, 该站是西气东输管线三线上的第一个压缩机站。在它建成时, 新的西气东输管线将具有每年输送 155 亿立方米天然气的容量。

820 km 长的管线, 途经 3 个省, 以北京为终点。天然气将从在土库曼斯坦的供应源经过中亚和西气东输管线的二线, 并从中国的塔里木盆地经过西气东输管线的一线输送给中国各地的用户。

(吉桂明 摘译)

this purpose a method for modeling an air and flue gas system of a turbocharged boiler based on a fluid network was presented. The fluid network models for various parts of the air and flue gas system of the turbocharged boiler were also established. The fluid network was used to obtain and calculate the coupling relationship between the flow rate and pressure of the system in question. A comparison of the simulation results and test data shows that the model under discussion enjoys a relatively high precision. On this basis the influence of a change in air and flue gas flow resistance on the performance of the turbocharged unit was further analyzed. It has been found that to increase the flue gas flow resistance of the boiler will result in an increase of the power consumed by the compressor and the power provided by the flue gas turbine will decrease accordingly. The power supplemented by the auxiliary steam turbine will increase and the steam supply capacity of the boiler will decrease correspondingly. The foregoing can offer reference for matching design of a turbocharged unit for a turbocharged boiler. Key words: turbocharged boiler; air and flue gas system; fluid network; simulation and modeling; resistance characteristics

600 MW燃煤锅炉二次汽欠温改造及实施效果 = Modification of a 600 MW Coal-fired Boiler Due to an Excessively Low Temperature of the Secondary Steam and Its Implementation Effectiveness [刊, 汉] YAN Lin-bo, HE Bao-shu (College of Electromechanical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044), MENG Jian-guo, CAO Jian-chen (Hebei Datang International Wangan Power Generation Co. Ltd, Tangshan, China, Post Code: 063611) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26 (3). — 328 ~ 332

Since its operation, No. 1 boiler of a power plant exists all along a problem of its secondary steam not reaching the design temperature at non-full loads, i.e. an excessively low temperature of the secondary steam, bringing about an adverse effect on the safety and cost-effectiveness of the boiler operation. A modification and rectification is urgently needed. As viewed from the long-term operation data and thermal balance analysis, the original heating surface of the boiler was not arranged most rationally and needed to be reconstructed. For this purpose, on the basis of a detailed check of the thermal calculation, three versions by cutting short the partition panel were presented for the reconstruction, i.e. cutting short the partition panel by 1, 2 and 3 meters respectively. Through a comprehensive contrast and analysis of the thermal calculation results, the modification of cutting short the high temperature platen of the boiler by 2 meters was chosen. After the reconstruction, the boiler realized a stable operation and the problem of the excessively low temperature of the secondary steam was solved with a satisfactory modification result being achieved. Key words: pulverized coal-fired boiler; excessively low temperature of secondary steam; partition panel; modification; thermal calculation

旋流对高温空气燃烧影响的模拟研究 = Numerical Simulation of the Influence of a Swirling Flow on High Temperature Air Combustion [刊, 汉] SU Ya-xin, WANG Wen-hui, DENG Wen-yi (College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, 201620). // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26 (3). — 333 ~ 337

Energy & Power — 2011, 26(3). — 333 ~ 337

Against the backdrop of the application of high temperature air combustion technology in industrial boilers, a simulation study was performed of the high temperature air combustion characteristics of the single nozzle combustor of a concentric type axial swirling flow high temperature air burner. The Reynolds stress model (RSM) was used in the turbulent flow transmission equation and the PDF (Probability density function)-based combustion model featuring the β function was employed by the gas phase combustion model. The radiation heat exchange process was simulated by using a discrete coordinate method. The NO_x model is of the thermal type. With natural gas serving as the fuel, when the preheated air temperature is 1 273 K, the oxygen content of the air reaches 8%. Under the condition of the total excess air factor for combustion being 1.1, a numerical simulation calculation was conducted. The influence of such parameters as the swirling flow angle and the spiral extension length of the burner etc. on NO_x emissions, local temperature, oxygen concentration and CO concentration distribution etc. was investigated. The research results show that the swirling flow burner can further reduce the NO emissions and make the combustion more complete. When the spiral rib extension factor $R=2$, fuel/air speed ratio $a=1.09$ and the swirling flow angle $\theta=180^\circ$, the NO emissions concentration attains the minimum, the outlet NO molar fraction hits 12.9×10^{-6} and the outlet CO molar fraction reaches 29×10^{-6} . When the swirling flow angle $\theta=0$ (direct jet flow), the above mentioned fractions are 31.7×10^{-6} and 372×10^{-6} respectively. Key words: industrial boiler, high temperature air combustion, swirling flow burner

CO_2 稀释对乙烯/空气扩散火焰烟尘形成和温度场的影响 = Influence of CO_2 Dilution on Ethylene/air Diffusion Flame caused Soot Formation and Its Temperature Field [刊, 汉] GU Zhong-zhu (College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, China, 210042) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 338 ~ 342

The diffuse light two-dimensional line of sight attenuation (2D-LOSA) technology was used to detect the volumetric concentration of the soot in the ethylene/air laminar flow diffusion flame diluted by carbon dioxide and its temperature distribution regularity. It has been found that when the fuel has been diluted by an appropriate amount of carbon dioxide, the production of soot in the flame can be greatly restrained with a very small influence on the temperature field. A maximum soot concentration will exist around the mid-height of the flame and its corresponding position will move up with an increase of the carbon dioxide concentration. At the bottom and top of the flame, almost no soot is produced. To add carbon dioxide to the fuel to contain the production of soot mainly depends on the dilution effect and direct chemical reactions, during which the latter play a role bigger than the former. Key words: soot formation, carbon dioxide, laminar flow diffusion flame, optical diagnosis

基于预测模型的模糊-PID控制试验研究 = Experimental Study of a Fuzzy-PID (Proportional, Integral and