

中心供风补燃装置气体扩散燃烧特性的数值模拟

张 亮,刘明珠,何兆斌

(中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要: 利用数值模拟方法对余热锅炉中心供风烟道式补燃装置的气体扩散燃烧特性进行研究。在燃气流量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 的工况下对比轴向温度分布和出口 NO_x 浓度分布的数值模拟与试验结果,二者吻合良好,证明了计算模型的正确性。通过进一步的计算表明:随过剩空气系数增加、空气含氧量增大或空气温度的降低,气体主流最大速度上升,而主流最大速度区域、速度衰减特性及 CH_4 组分的轴向和径向分布变化不大;在低过剩空气系数、高含氧量、高空气温度时,火焰呈“细长”型;反之,火焰呈“短粗”型;在低过剩空气系数、低含氧量、高空气温度时,火焰的温度分布更为均匀;增加过剩空气系数及降低空气含氧量和空气温度,可有效减少出口 NO_x 排放;出口 CO 浓度仅与过剩空气系数(即空气流量)有关,与空气含氧量及空气温度无关。

关 键 词: 中心供风; 扩散燃烧; 流动特性; 火焰特性; 排放特性

中图分类号: TK223 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.025

引 言

余热锅炉烟道式补燃主要是利用入口烟道的空间布置气体燃烧器,并以燃机排烟中的过剩空气作为助燃空气进行燃烧^[1]。传统的补燃方式多采用中心供燃气,周向供空气的燃烧方式,并在燃气喷口附近加装旋流稳燃装置,但该方法会带来温度分布不均匀、燃烧不稳定及 NO_x 排放超标等一系列问题^[2-3]。

文献[4]首次提出了颠倒燃料剂和氧化剂入口布置的思想,并成功应用于全流量补燃循环发动机的气-气喷注器领域;文献[5-7]则分别研究了类似结构的气-气喷注器的结构参数、燃料种类及不同设计参数对气体燃烧特性的影响;文献[8]通过分析燃烧组分和燃烧温度的变化趋势及 NO_x 的生成规律,研究了一种五喷口燃烧器(空气喷口位于中心,燃料喷口均匀布置在四周)的 NO_x 生成规律。综合上述研究结果发现:采用中心供风,周向供燃气

的燃烧方式具有温度分布均匀及 NO_x 排放指标低等优点,可有效解决传统烟道式补燃的缺陷。

本研究首次将颠倒燃料剂和氧化剂入口布置的思想应用于余热锅炉烟道式补燃装置,并设计了一组基本单元为正六边形布置的气体燃烧器(可根据补燃量进行扩容)。根据所设计的燃烧器建立几何模型和数学模型,并通过对比试验验证了计算模型的正确性,同时利用上述模型研究了过剩空气系数、空气含氧量及空气温度对中心供风燃烧方式流动特性、火焰特性和排放特性等燃烧特性的影响,所得结果可为进一步探索该型烟道式补燃装置的工业化应用奠定基础。

1 计算模型及试验系统

1.1 物理模型及网格划分

燃烧器中心布置 6 孔空气通道,喷孔按正六边形排列,燃气从燃烧器侧部进入,通过出口截面布置的 24 个喷孔喷出;燃烧方式为扩散燃烧,具体结构如图 1 所示。为保证流动充分发展而不受壁面影响,燃烧室结构设计为圆柱型,各部分主要参数如表 1 所示。

表 1 主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters

参数	数值/m
燃气喷孔半径 R_f	0.002
空气喷孔半径 R_a	0.024
燃烧室长度 L	1.5-3.5
燃烧室直径 D	0.25-0.5

考虑物理模型的结构对称性及计算时间与计算速度的经济性,计算区域选用燃烧室的 1/6 区域,且不包括气体流动通道。对喷口附近网格进行局部加密,并进行了网格无关性验证,最终确定整个计算区

收稿日期: 2014-01-12; 修订日期: 2014-04-11

作者简介: 张 亮(1983-),男,天津人,中国船舶重工集团公司第七〇三研究所工程师。

域共划分约 25 万网格,入口截面网格如图 2 所示,纵向截面网格如图 3 所示。

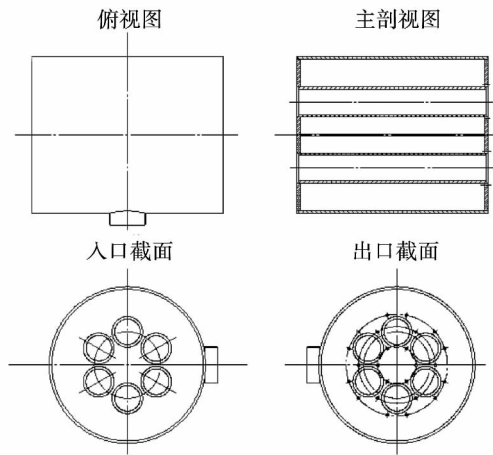


图 1 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure

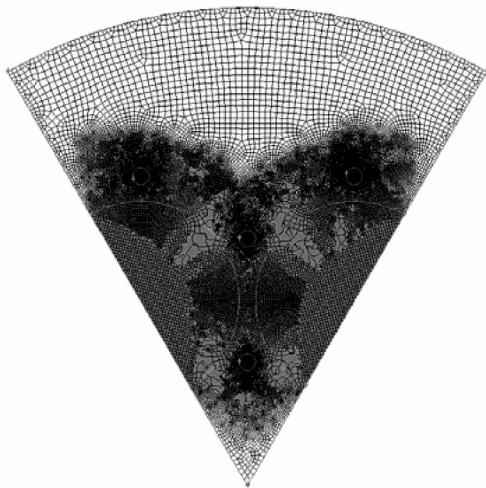


图 2 入口网格加密图

Fig. 2 Chart showing the refined grid at the inlet

1.2 数学模型及定解条件

采用标准 $k - \epsilon$ 湍流模型模拟气体流动,采用 Magnussen 提出的涡耗散模型及双步反应机制模拟化学反应^[9],采用离散坐标法模拟辐射换热^[10],其中烟气辐射特性采用灰气体加权模型^[11],而 NO_x 模型则考虑热力型和快速型两种生成机制^[12]。

利用二阶迎风差分格式离散方程,采用 SIMPLE 算法进行求解。燃气和空气入口采用速度入口边界条件,给定入口水力直径、湍流强度、燃气温度和组分;燃烧室出口采用压力出口边界条件,给定出口水力直径;壁面采用绝热无滑移固体壁面边界条件。

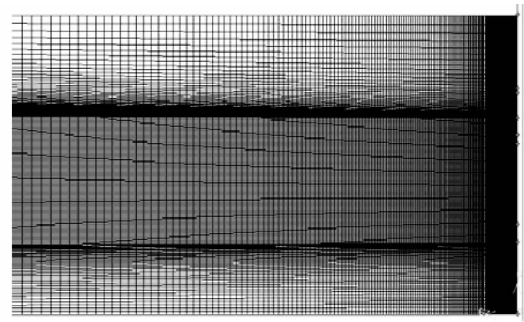


图 3 纵向截面网格加密图

Fig. 3 Chart showing the refined grid in a longitudinal cross section

燃料为天然气,其组成如表 2 所示。由于所采用天然气中 CH_4 组分(质量百分比含量,下同)高达 96.23%,而其它组分含量甚微,因此在模拟中将其它可燃组分折算成 CH_4 ,而将不可燃组分折算成 N_2 ,并利用 CH_4 的气体性质进行计算。

表 2 天然气组成

Tab. 2 Composition of nature gas

参数	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	CO_2	N_2
质量百分比/%	96.23	1.77	0.30	0.14	0.59	0.97
折算质量百分比/%	CH_4 98.44% N_2 1.56%					

1.3 试验及计算工况

试验工况过剩空气系数变化范围为 1.1 - 3.0,而其它参数则保持不变。利用计算工况分别考察不同过剩空气系数、空气温度和空气含氧量对燃烧特性的影响。各工况参数如表 3 所示。

表 3 试验及计算工况

Tab. 3 Operating conditions which were tested and calculated

参数	数值	
	试验工况	计算工况
燃气流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	20	20
燃气温度/K	293	293
空气流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	210 - 580	210 - 580
过剩空气系数	1.1 - 3.0	1.1 - 3.0
空气温度/K	293	293 - 500
空气含氧量/%	23	6 - 30

计算工况的表示方法为过剩空气系数 - 空气含氧量 - 空气温度,例如: 2.0 - 0.23 - 300,即表示该工况过剩空气系数为 2.0,空气含氧量为 23%,空气温度为 300 K。

1.4 试验验证

本试验系统如图 4 所示。试验所需燃气由天然气气站供应,助燃空气由鼓风机供应,并通过电动调节阀控制空气流量;燃烧室内、外壁之间利用公用系统的循环水进行冷却,以防止燃烧室热载过大;在燃烧室轴线上布置 8 个测点,可进行速度、温度及各组分浓度分布的测量。同时,在燃烧室出口区域布置了烟气成分分析测点,对燃烧状态进行监测。全部试验数据由在线数据采集系统收集;整个燃烧系统通过 PLC 控制,并配备自动点火和熄火保护程序,可实现全自动运行。

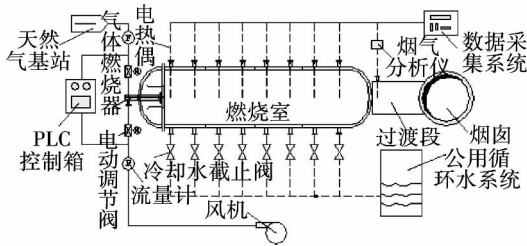


图 4 试验系统图

Fig. 4 Diagram of the test system

由于试验台仍处于建设完善阶段,一些诸如温度、速度及组分的测试设备还没有到位。因此,针对于本模拟工作的验证,主要以燃烧室出口处 NO_x 的浓度变化作为对比分析的依据。

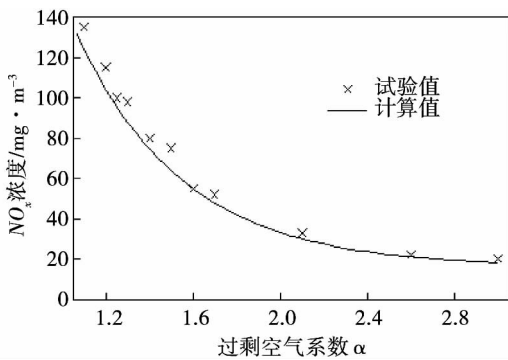


图 5 出口 NO_x 浓度对比

Fig. 5 NO_x concentration at the outlet

图 5 为不同过剩空气系数对应的出口 NO_x 浓度变化。其中, NO_x 浓度为折算至标准状态下 6% O_2 干基烟气中的 NO_x 浓度(下同)。对比可见:随过剩空气系数增加,试验 NO_x 浓度由 $135 mg/m^3$ 下降至 $20 mg/m^3$,而计算 NO_x 浓度则由 $131 mg/m^3$ 下降至 $18 mg/m^3$,二者变化趋势相同,但数值模拟计算

值略小于试验值,最大误差为 14.3%。分析原因,是由于试验测量的烟气中 NO_x 成分更为复杂^[13],而在计算 NO_x 时,只考虑了热力型 NO 和快速型 NO 的生成。

鉴于本研究是侧重于工程应用的基础研究,因此上述计算误差属于可接受范围。

2 计算结果分析及讨论

2.1 流动特性分析

图 6 为在不同影响因素下气体主流速度的分布。图中横坐标为测量距离 L 与最大轴向距离 L_0 (燃烧室长度)的比值,即测点相对位置。沿流动方向,气体主流速度先增至最大然后开始衰减,射流刚性较强。增加过剩空气系数和空气含氧量及降低空气温度,均可提高气体主流区的最大速度,但上述因素对主流最大速度的出现区域及速度衰减影响不大。

其中,当空气含氧量和空气温度不变时,气体的主流速度随着过剩空气系数的增大而逐渐增大。这主要是由于进入燃烧室内的空气流量增加所导致的;当过剩空气系数和空气温度不变时,气体的主流速度随着空气含氧量的提高而逐渐增大。这主要是由于局部氧气浓度增加致使燃烧反应速率加快,从而加强了局部气流的湍动所导致;而当过剩空气系数和空气含氧量不变时,气体的主流速度随着空气温度的提高而逐渐减小。这主要是由于燃烧反应为放热反应,温度的升高使得化学反应平衡向逆反应方向移动,并在一定程度上降低了正反应的速率,从而减弱了局部气流的湍动所导致。

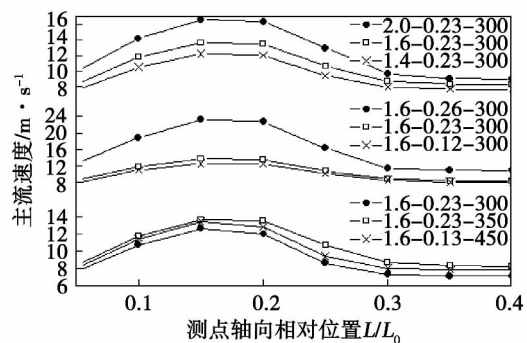


图 6 主流速度分布

Fig. 6 Variation law governing the distribution of the velocity in the mainstream

图 7 为不同影响因素下 CH_4 质量分数沿轴向 (流动方向) 的分布。 CH_4 质量分数含量沿流动方向呈逐渐降低的趋势。这是由于空气射流处于燃烧室相对中心的区域, 因此随着气体的流动, 氧气流开始向四周扩散, 卷吸附近的燃气, 并使得燃烧反应加剧, 此时 CH_4 质量分数开始下降; 待反应强度达到最大时, CH_4 质量分数降至最低; 随着流动的继续进行, CH_4 质量分数基本不变, 这说明此阶段燃烧反应已经完成, 混合气体已变为完全燃烧后的烟气。

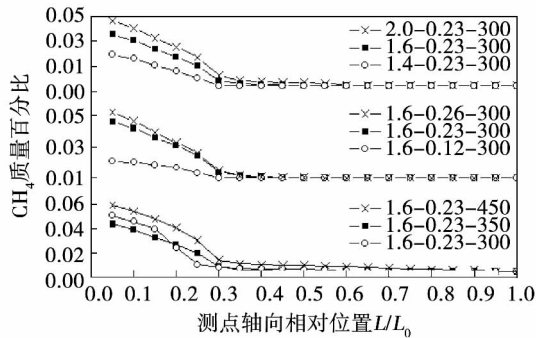


图 7 轴向 CH_4 组分分布

Fig. 7 Variation law governing the constituents of CH_4 along the axial direction

图 8 为计算工况 1.6 - 0.23 - 300 时, CH_4 质量分数分布。图中横坐标为测量半径 R 与燃烧室半径 R_0 的比值, 即测点径向相对位置。在相同截面上, 径向的 CH_4 质量分数呈先增大后减小的变化趋势; 比较流动方向各截面的 CH_4 质量分数, 其最大值逐渐降低, 其位置逐渐靠近壁面, 并最终变为零。这是由于燃气射流出口位于中心轴线和外壁面之间, 因此 CH_4 质量分数在中心轴线处较低, 在靠近壁面的外部区域也逐渐降低, 质量分数分布的峰值位于两个区域之间; 且随着燃烧反应的进行, CH_4 质量分数分布的峰值逐渐降低, 并远离中心轴线; 在燃烧室下游区域, CH_4 质量分数趋近于零, 这表明燃烧反应已基本结束。

2.2 火焰特性分析

图 9 为不同过剩空气系数对燃烧室火焰最高温度和平均温度的影响。当空气含氧量和空气温度一定时, 随着过剩空气系数的增加, 火焰最高温度和平均温度均呈下降趋势, 且二者之间的温差逐渐增大, 温度分布均匀性变差。分析原因, 是由于过剩空气系数的增加, 实为空气流量的增加, 而大量过剩的冷空气进入到燃烧室内则会吸收大量的燃烧反应放

热, 并因此导致了火焰最高温度和平均温度的下降。

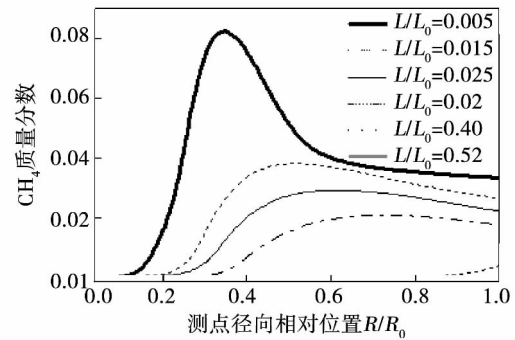


图 8 CH_4 径向组分分布

Fig. 8 Variation law governing the constituents of CH_4 along the radial direction

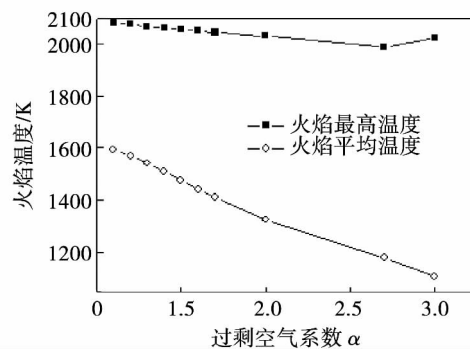


图 9 过剩空气系数对火焰温度的影响

Fig. 9 Effect of the excess air coefficient on the flame temperature

图 10 为不同空气含氧量 (质量百分比, 下同) 对燃烧室火焰最高温度和平均温度的影响。当过剩空气系数及空气温度不变时, 火焰最高温度和平均温度随着空气中氧含量的增加而上升, 且二者之间的温差逐渐增大, 温度分布均匀性变差。这是由于若保持过剩空气系数一定时, 随着空气中氧含量的增加, 则必然会增加总的空气流量, 并因此导致进入到燃烧室内的过剩冷空气增加, 吸收大量的燃烧反应放热。

图 11 为不同空气温度对燃烧室火焰最高温度和平均温度的影响。当过剩空气系数及空气中氧含量不变时, 火焰最高温度和平均温度随着助燃空气温度的上升而增加, 且二者之间的温差逐渐减小, 温度分布更为均匀。这是由于燃烧反应为放热反应, 根据化学反应平衡, 提升温度则放热反应更为剧烈, 同时, 由于温度的提升也使得带入燃烧室内的过剩

空气吸收的反应放热减少。

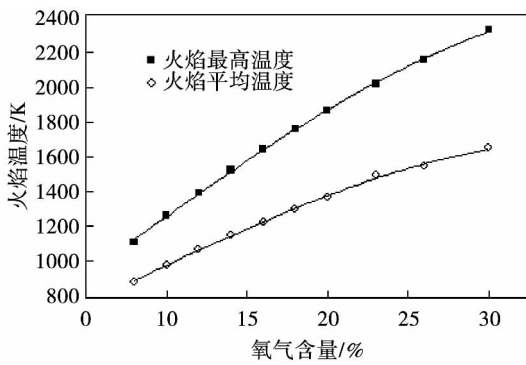


图10 助燃空气含氧量对火焰温度的影响
Fig. 10 Effect of the oxygen content in the combustion-aided air on the flame temperature

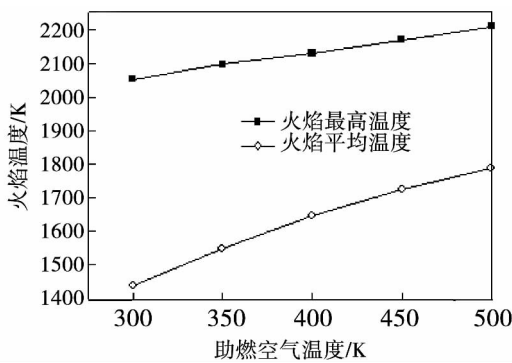


图11 助燃空气温度对火焰温度的影响
Fig. 11 Effect of the combustion-aided air temperature on the flame temperature

图12为不同过剩空气系数对火焰长度及火焰最大半径的影响。随着过剩空气系数的增大,气体燃烧反应由贫氧状态逐渐转为富氧状态,反应强度加剧、反应时间缩短,因此火焰长度显著减小;而过剩空气系数的增加则导致了进入燃烧室内空气速度上升,此时火焰在径向的扩散作用得到增强,因此火焰的最大直径变大。

图13为不同空气含氧量对火焰长度和火焰最大直径的影响。随着空气含氧量的增加,所需的总空气流量减小,燃烧反应强度下降,反应区域延长,火焰长度变长;而含氧量的增加则导致了燃烧室单位空间内氧浓度的上升,从而减弱了火焰的扩散作用,并使其最大直径变小。

图14为不同空气温度对火焰长度及火焰最大直径的影响。随着空气温度的上升,燃烧室内沿流动方向的温度梯度变小,可对火焰起到“拉伸”作

用;而沿径向的温度梯度变大,可对火焰起到“压缩”作用,二者作用的叠加则最终导致了火焰长度增长,火焰最大直径减小。

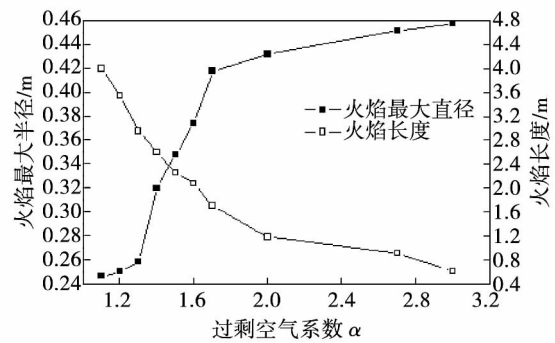


图12 过剩空气系数对火焰形状的影响
Fig. 12 Effect of the excess air coefficient on the flame shape

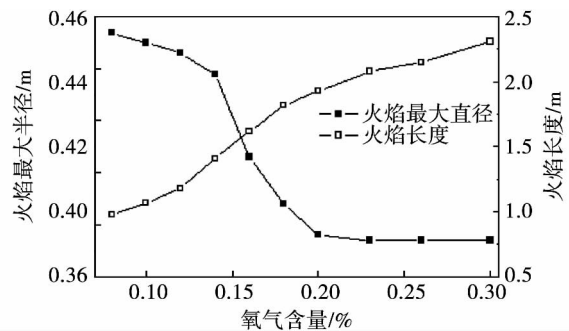


图13 助燃空气含氧量对火焰形状的影响
Fig. 13 Effect of the oxygen content in the combustion-aided air on the flame shape

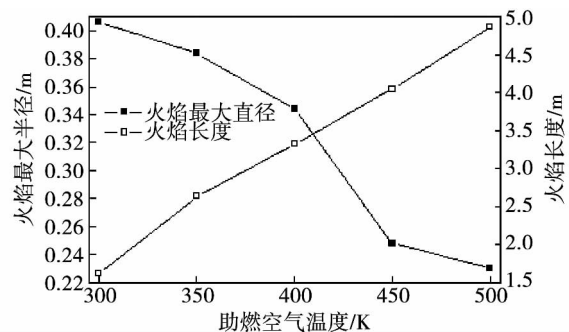


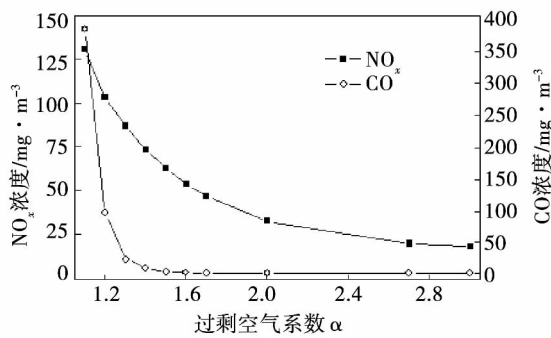
图14 助燃空气温度对火焰形状的影响
Fig. 14 Effect of the combustion-aided air temperature on the flame shape

可见,在低过剩空气系数、高含氧量、高空气温度时,火焰呈“细长”型;反之,火焰呈“短粗”型;而在低过剩空气系数、低含氧量、高空气温度时,火焰

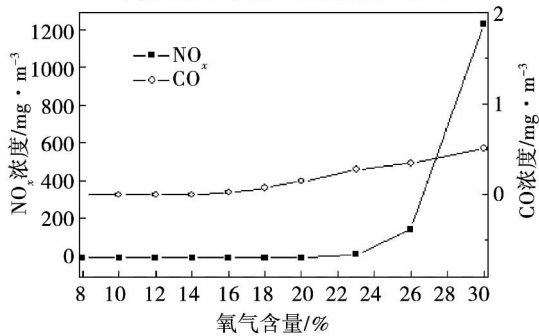
的温度分布更为均匀。根据上述规律可有效的指导本型燃烧装置的设计与优化, 并使其满足不同的火焰特性要求。

2.3 排放特性分析

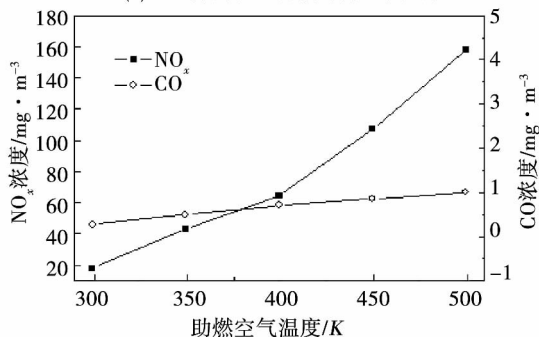
图 15(a) 为不同过剩空气系数对燃烧室出口产物 NO_x 和 CO (折算至标准状态下, 6% O_2 干基烟气中的 CO 浓度, 下同) 浓度的影响。保持空气含氧量和空气温度不变的条件下, 当过剩空气系数大于 2.0 时, NO_x 排放浓度由最大 131 mg/m^3 降至约为 20 mg/m^3 ; 而当过剩空气系数大于 1.30 时, CO 排放浓度则由 403.2 mg/m^3 下降至 0 mg/m^3 。



(a) 过剩空气系数对排放特性的影响



(b) 空气含氧量对排放特性的影响



(c) 空气温度对排放特性的影响

图 15 NO_x 和 CO 排放特性

Fig. 15 NO_x and CO emissions characteristics

图 15(b) 为不同空气含氧量对燃烧室出口产物 NO_x 和 CO 浓度的影响。保持过剩空气系数和空气

温度不变的条件下, 当空气含氧量小于 23% 时, 出口 NO_x 浓度迅速降至接近于 0 mg/m^3 ; 而此时空气含氧量则对出口 CO 浓度影响不大, 其变化范围仅为 $0 - 0.51 \text{ mg/m}^3$ 。

图 15(c) 为不同空气温度对燃烧室出口排放产物质量浓度的影响。保持过剩空气系数和空气含氧量不变的条件下, 随空气温度的上升, 出口 NO_x 浓度由 18 mg/m^3 迅速增加至 158.3 mg/m^3 ; 而此时空气温度则对出口 CO 浓度影响不大, 其变化范围仅为 $0.27 - 1.01 \text{ mg/m}^3$ 。

分析造成上述现象的原因是由于过剩空气系数的增加、空气含氧量的降低和空气温度的下降均导致了燃烧室内温度的下降, 从而使得燃烧初期的热解氛围和燃烧后期的还原性氛围得到了增强, 进而增加了燃料氮和 NO_x 转化为 N_2 的生成量, 最终降低了出口 NO_x 浓度。而出口 CO 浓度则是由反应的完全程度所决定, 仅与过剩空气系数(即空气流量)有关, 而与空气含氧量及空气温度无关。

3 结 论

建立了中心供风燃烧装置的计算模型, 通过数值模拟, 得到了燃烧室轴线温度分布及出口 NO_x 浓度, 其计算结果与相应的试验结果符合较好, 并通过进一步数值计算得到结论:

(1) 对于流动特性, 随过剩空气系数增加、空气含氧量增大或空气温度的降低, 气体主流最大速度上升, 但对主流最大速度区域、速度衰减特性及 CH_4 组分的轴向和径向分布影响不大;

(2) 对于火焰特性, 在低过剩空气系数、高含氧量、高空气温度时, 火焰呈“细长”型; 反之, 火焰呈“短粗”型; 而在低过剩空气系数、低含氧量、高空气温度时, 火焰的温度分布更为均匀;

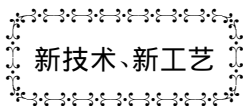
(3) 对于排放特性, 增加过剩空气系数及降低空气含氧量和空气温度, 可有效减少出口 NO_x 排放; 而出口 CO 浓度仅与过剩空气系数(即空气流量)有关, 与空气含氧量及空气温度无关。

参考文献:

[1] 于朝阳, 王建志, 贺 年. 余热锅炉装置的研究[J]. 热能动力工程 2004, 19(5): 534-536.
YU Chao-yang, WANG Jian-zhi, HE Nian. Research of HRSG devices[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(5): 534-536.

- [2] Alessandro Franco. Analysis of small size combined cycle plants based on the use of supercritical HRSG [J]. Applied Thermal Engineering 2011 31(2): 785 - 794.
- [3] 王义方, 王建志, 杨立发. 变工况对补燃燃烧影响的数值模拟 [J]. 节能技术 2008 26(150): 316 - 320.
WANG Yi-fang, WANG Jian-zhi, YANG Li-fa. Numerical simulation of the influence of the off-design operating conditions on the complementary combustion [J]. Energy Conservation Technology, 2008 26(150): 316 - 320.
- [4] Calhoun D F, Ito J I J, Kors D L. Investigation of gaseous propellant combustion and associated injector/chamber design guidelines [R]. CR - 121234, US: NASA, 1973.
- [5] Shyy W, Tucker P K, Vaidyanathan R. Response surface and neural network techniques for rocket engine injector optimization [J]. Journal of Propulsion and Power 2001 7(2): 391 - 401.
- [6] Marshall W M, Pal S, Woodward R D, et al. Benchmark wall heat flux data for a GO_2/GH_2 single element combustor [R]. USLBT-TRS, AIAA2005 - 3572 2005.
- [7] 李茂, 杜正刚, 金平, 等. 富氢/富氧燃气同轴直流喷嘴燃烧过程数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(4): 469 - 473.
LI Mao, DU Zheng-gang, JIN Ping, et al. Numerical simulation of the combustion process of H_2/O_2 -enriched fuel gas outgoing from a coaxial once-through nozzle [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2010 36(4): 469 - 473.
- [8] 杨艳超, 苏亚欣, 万鑫. 新型低 NO_x 排放高温空气燃烧的数值模拟 [J]. 能源研究与信息 2008 24(3): 156 - 160.
YANG Yan-chao, SU Ya-xin, WAN Xin. Numerical simulation of the high temperature air combustion with new low NO_x emissions [J]. Energy Source Research and Information 2008 24(3): 156 - 160.
- [9] Westbrook C K, Dryer F L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames [J]. Combustion Science and Technology, 1981 27(1): 31 - 43.
- [10] Chui E, Raithby G. Computation of radiant heat transfer on a non-orthogonal mesh using the finite-volume method [J]. Numerical Heat Transfer B-Fund 1993 23(3): 269 - 288.
- [11] Modest M F. The weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary solution methods in radiative transfer [J]. ASME Journal Heat Transfer 1991 113(3): 650 - 656.
- [12] Hill S C, Smoot L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science 2000 26(4-6): 417 - 458.
- [13] Pershing D W, Wendt J L. Relative contribution of volatile nitrogen and char nitrogen to NO_x emissions from pulverized coal flames [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development 1979 18(1): 60 - 67.

(丛敏 编辑)



利用省煤器 - 冷凝器提高热水锅炉燃烧天然气的效率

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.026

据《Теплоэнергетика》2013 年 7 月刊报道, 在利用省煤器时, 不仅利用了燃烧产物冷凝的潜热, 而且大大增加了(20% - 30%)干燃烧产物的放热量。

利用省煤器, 在锅炉负荷(10% - 100%)和热网水温的整个范围内(其中也包括高于 60 °C 的温度)促进了烟气热量的回收和利用。

将余热锅炉布置在锅炉系统中, 降低 CO_2 和 NO_x 排放物, 虽然此时近地面的浓度会略有增加。

计算表明, 对于所研究的 KBGM - 100 锅炉 - 省煤器组件, 锅炉总效率将提高 8.04%。

(吉桂明 摘译)

signed a control system. Finally, the method above-mentioned was used in a 600 MW supercritical once-through unit. An analysis of the data actually measured proved that the control system can accomplish a stable control over the intermediate point temperature and real-time responded the change of the load at the same time of accommodating to the off-design operating conditions, thus guaranteeing a safe and economic operation of the electric power system.

Key Words: nonlinear control, supercritical once-through boiler, intermediate point temperature, load demand

中心供风气体扩散燃烧特性的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Air Diffusion Combustion Characteristics of a Central Air Supply Firing Device** [刊 汉] ZHANG Liang, LIU Ming-zhu, HE Zhao-bin (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(6). -703 -709

By using the numerical simulation method, studied were the air diffusion combustion characteristics of a central air supply flue duct type firing device in a heat recovery steam generator. Under the operating condition of a fuel gas flow rate being $20 \text{ m}^3/\text{h}$, a contrast of the numerical simulation results of the axial temperature distribution and NO_x concentration distribution at the outlet with the test ones shows that they are in good agreement and proves that the calculation model is correct. The further calculation results indicate that with an increase of the excess air coefficient and the oxygen content of air or a decrease in air temperature, the maximum speed of the gas in the main stream will increase, however, the maximum speed area, speed attenuation characteristics of the main stream and the axial and radial distribution of CH_4 component will change not big. When the air excess coefficient is low, the oxygen content is high and the air temperature is high, the flame will be of a “slender” type and to this contrary, the flame will be of a “stubby” type. When the air excess coefficient is low, the oxygen content is low and the air temperature is high, the temperature distribution of the flame will be more uniform. To increase the excess air coefficient and decrease the oxygen content and temperature of air can effectively reduce the NO_x emissions at the outlet. In addition, the CO concentration is only relevant to the excess air coefficient (i. e. the air flow rate) but irrelevant to the oxygen content and the temperature of air. **Key Words:** central air supply, diffusion combustion, flow characteristics, flame characteristics, emission characteristics

弯尾管亥姆霍茨型无阀自激脉动燃烧器传热特性 = **Heat Transfer Characteristics of a Bent Tail Tube Helmholtz Type Valveless Self-excited Pulsation Burner** [刊 汉] XU Yan-ying (College of Safety Engineering, Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, Shenyang, China, Post Code: 110136), ZHAI Ming, DONG Peng (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(6). -610 -714