

文章编号:1000-582X(2012)06-085-07

煤改低浓度煤层气锅炉的燃烧及 NO_x 排放特性

陈艳容^{a,b}, 张 力^{a,b}, 闫云飞^{a,b}, 张代生^a

(重庆大学 a. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室; b. 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 将燃煤链条炉改烧低浓度煤层气, 运用数值模拟方法并结合实验对改造后的低浓度煤层气锅炉炉膛内的流动、燃烧及 NO_x 排放特性进行了研究。结果表明, 速度约在炉膛轴向距喷口 0.5 m 处达到最大值, 在炉膛宽度方向 $-0.4\text{ m} < l < 0.4\text{ m}$ 范围内剧烈衰减。随热负荷增加, 炉膛轴线上最高温度后移, 模拟与试验结果吻合较好。炉膛前部截面处沿炉膛宽度方向, 低负荷下温度呈明显的双峰分布, 100% 负荷下呈单峰分布; 但炉膛中后部温度均呈现双峰分布。炉膛出口烟温随热负荷的增加近似成线性增加, 实验测量烟温略低于模拟值。NO_x 的生成主要集中在炉膛中后部的高温区, 且 NO_x 峰值位置远滞后于温度峰值。随过量空气系数的增大, 炉内最高温度与 NO_x 生成量均先增大后减小。

关键词: 煤; 煤层气; 锅炉; 燃烧; NO_x 排放

中图分类号: TK16

文献标志码: A

Characteristics of combustion and NO_x emission in low concentration coal bed methane boiler retrofitted from coal-fired boiler

CHEN Yan-rong^{a,b}, ZHANG Li^{a,b}, YAN Yun-fei^{a,b}, ZHANG Dai-sheng^a

(a. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education;

b. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Coal-fired chain grate boiler is retrofitted to coal bed methane boiler. The flow, combustion and NO_x emission characteristics of low concentrations methane in the boiler furnace are studied by the numerical simulation and experiments. The results show that the axial velocity reaches the maximum at 0.5 m from the nozzle and declines sharply in the range of $-0.4\sim 0.4\text{ m}$ on the width direction. With the heat load increases, the position of highest temperature moves to the rear of furnace and the simulation and experimental results agree well. At the front of the furnace, the obvious bimodal distribution of temperature at low heat load along the width direction is found, but it is a single peak distribution at 100% heat load. At the rear of the furnace, the temperature shows bimodal distribution at all kinds of heat loads. Gas temperature at boiler furnace outlet increases linearly with the increasing of heat load but the experimental results are slightly lower than the simulated results. The NO_x is mainly produced in the middle and rear of furnace with high temperature, and the position of NO_x peak lags far behind that of temperature peak. With the excess air coefficient increases, the highest furnace temperature and NO_x generation increases and then decreases.

Key words: coal; coal bed methane; boiler; combustion; NO_x emission

收稿日期: 2012-01-09

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(2009BA6067)

作者简介: 陈艳容(1976-), 女, 重庆大学博士, 主要从事燃烧与环保方向研究, (E-mail) chenyanrong@cqu.edu.cn.

以煤为燃料的工业锅炉和生活锅炉每年排放大量的烟尘、粉尘和 SO_2 , 对环境污染极大, 如将其改造为燃气锅炉, 不仅可明显改善环境, 也能减少锅炉受热面的磨损及沾污, 提高锅炉自身的自动化程度、燃烧效率和热效率^[1]。煤层气的主要成分甲烷, 温室效应是 CO_2 的 21 倍, 但同时也可以作为一种高效、洁净能源加以利用。对煤层气进行开发利用可以防范瓦斯事故, 有效减排温室气体, 高效利用洁净能源, 在一定程度上能缓解能源危机, 改善能源结构^[2-3]。煤层气已广泛应用于发电、化工、民用、工业及车用燃料等领域。

对低浓度煤层气的利用, 多采用混烧^[4]、甲烷提纯^[5]、改善着火条件和优化燃烧区结构形成回流区等稳燃技术^[6-8]。嵇文娟^[9]从锅炉的结构、传热、热效率等方面对煤改气锅炉进行可行性分析, 表明改造后锅炉的热效率至少可提高 10%。邢献军等^[10]通过在燃煤锅炉炉膛内安装常温空气无焰燃烧反应器, 进行锅炉煤改气的改造。该实验表明改造后锅炉的热效率可达到 92.92%, 比改造前提高 30% 以上, 实现了无焰燃烧, 使反应器温度分布更均匀, 污染物排放也远低于国家标准。相关研究的重点主要是如何提高低热值燃气燃烧的稳定性和燃烧效率, 而对污染物的生成因素研究较少。低热值燃料热值低, 为了获得较高的燃烧效率通常应尽量提高燃烧室的温度, 而为减少 NO_x 的排放则需降低燃烧室火焰中心的温度。因此应优化燃烧室火焰中心温度, 以协调高效燃烧和低 NO_x 排放之间的关系。文中主要通过燃烧器及炉膛结构的改造, 使燃煤链条炉能够稳定燃烧低浓度煤层气。由于锅炉改造后, 燃料和炉膛结构发生变化, 使炉内的流动、温度及排放特性发生变化, 因此有必要对改造后的锅炉进行深入研究, 探索煤改气锅炉的流动、温度、排放特性的变化规律, 为实现燃烧系统优化提供参考。

1 煤改气实验方案及物理模型

以改烧低浓度煤层气后 DZL4-1.25-A 型燃煤链条炉为研究对象, 锅炉的额定负荷为 4 t/h, 改造前锅炉的最大出力小于额定负荷, 改造后锅炉的出力可达额定负荷。改造时, 拆除原锅炉的给煤、传动及除渣装置, 为增强炉内辐射换热和稳定燃烧, 在炉膛后部炉排上用两层耐火砖砌成挡火墙。增加防爆门、送引风系统及自动点火、火焰监测系统。锅炉前墙对称布置 2 台水平间距为 0.8 m 的低热值煤层气燃烧器。在炉膛前墙外布置 0.5 m 长的稳燃室, 炉膛长 2.0 m, 宽 1.5 m, 高 1.0 m。改造后的燃气锅

炉为负压燃烧, 额定负荷下单台燃烧器消耗低浓度煤层气 $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 试验时所采用煤层气燃料的甲烷浓度为 30%~36%, 采用 S 型热电偶测量炉膛温度, 温度测点布置在炉膛中心轴线距燃烧器喷口 0.2、0.8、1.4、1.8、2.2 m 处。由于炉膛是对称结构, 仅取 1/2 作为模拟研究对象, 物理模型如图 1 所示。燃烧器喷口中心线距离炉内底面 0.07 m, 煤层气由燃烧器中心管喷入稳燃室, 而空气由布置在中心管周边的 12 根直管喷入稳燃室, 燃烧器喷口布置如图 2 所示。

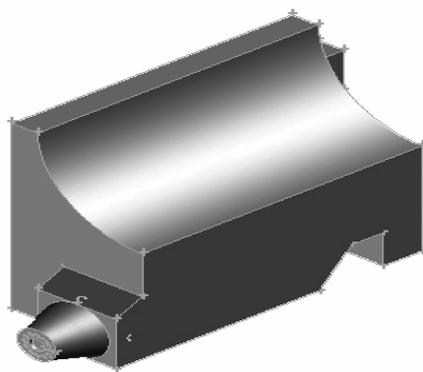


图 1 物理模型

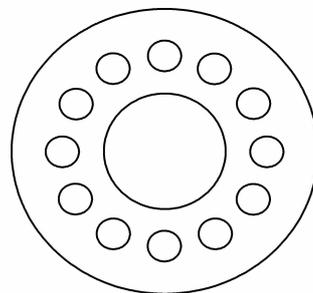


图 2 燃烧器喷口布置图

2 数值方法

采用标准的 $k-\epsilon$ 双方程湍流流动模型, 常数取值为: $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $k = 1.0$, $\epsilon = 1.2$ 。燃烧传热模型采用有限速率化学反应模型及 P1 辐射模型, NO_x 的生成采用 Thermal NO_x 的 PDF 输运方程模型。分区划分网格, 稳燃室区域采用非结构化四面体网格, 炉膛区域采用结构化六面体网格, 总网格数约为 39 万。采用压力出口条件, 出口表压为 -20 Pa 。水冷壁壁面采用无滑移定壁温条件, 设壁面温度为 510 K, 前墙、挡火墙壁面以及炉膛底面设为绝热壁面。模拟时采用体积比为 35%:65% 的 CH_4 和 N_2 混合气替代低浓度煤层气。过量空气系数为 1.05, 空气与煤层气入口温度为 300 K。数学

模型主要包括连续性方程、组分方程、动量方程、能量方程及理想气体状态方程等控制方程^[11]。数值模拟采用三维稳态及 SIMPLE 算法。

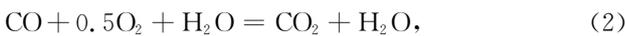
3 反应机理

3.1 甲烷燃烧反应机理

采用 Dryer^[12-13]等提出的甲烷空间反应机理。



$$r_1 = -1.585 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{202.6}{RT}\right) [\text{CH}_4]^{0.7} [\text{O}_2]^{0.8}.$$



$$r_2 = 5.623 \times 10^{14} \exp\left(-\frac{180}{RT}\right) [\text{CO}] [\text{H}_2\text{O}]^{0.5} [\text{O}_2]^{0.25}.$$

3.2 NO_x 生成机理

燃烧过程中生成的 NO_x 主要包括热力型、快速型和燃料型 NO_x^[14]。由于所采用的气体燃料氮含量极低,忽略燃料型 NO_x。对于 NO_x 的生成,通常是指 NO 和 NO₂,也包含更少量的 N₂O(约 1%)。由于 NO₂ 主要由一部分 NO 在火焰带下游或排放后转化生成的,且强烈依赖 NO 浓度,比 NO 浓度低 2 个量级。因此,文中以 NO 的生成量近似代替为 NO_x 的生成量。

1) 热力型 NO_x 生成机理

热力型 NO_x 是由于空气中氮气的高温氧化,采用 Zeldovich 机理^[15],包含 3 个反应:



热力型 NO_x 的生成速率为

$$r_{\text{thermal,NO}} = 7.2 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{318\,855}{RT}\right) [\text{O}_2] [\text{N}_2]$$

2) 快速型 NO_x 生成机理

快速型 NO_x 是燃料燃烧时产生的烃类物质 CH_i 等撞击空气中的氮分子先生成 CN、HCN 等,之后又被氧化而形成。通常在不含氮的碳氢化合物、过量空气系数小于 1、低温下燃烧时生成较多。其控制反应^[16]为



快速型 NO_x 生成速率的经验公式为

$$r_{\text{prompt,NO}} = 1.05 \times 10^{10} \exp\left(-\frac{303\,474}{RT}\right) \left(\frac{RT}{p}\right) [\text{CH}_i] [\text{N}_2]$$

式中: R 为理想气体常数; T 为绝热温度,K; $[i]$ 为反应物 i 的浓度,kmol/m³; p 为压力,Pa。

4 结果与分析

燃煤链条炉改烧低浓度煤层气后的试验研究表

明,炉内形成了长 2.3 m、宽 0.75 m 的火焰,充满度较好,最高火焰温度为 1 535 K,燃烧效率为 99.4%,锅炉热效率为 87.5%,比改造前的燃煤锅炉提高了 25.5%^[17]。

4.1 速度特性

图 3 为不同热负荷下沿炉膛中心轴线方向的速度变化。表明在 100%、75%、50% 及 25% 热负荷下,沿炉膛轴线方向,速度均在距喷口 0.5 m 附近达到最大值。且随负荷降低,速度峰值逐渐降低,由 100% 负荷下的 52.6 m/s 下降到 25% 热负荷下的 13.3 m/s。

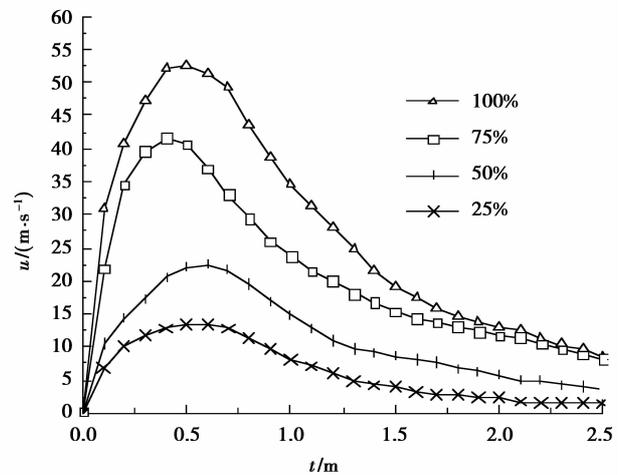


图 3 不同热负荷下沿炉膛中心轴线上的速度分布

图 4、图 5 分别为炉膛轴向 $z=0.5$ m、 $z=1.5$ m 位置处,高为 0.5 m 时不同热负荷下沿炉膛宽度方向的速度变化。表明 2 个位置处,沿炉膛宽度方向速度均呈对称分布,燃烧器中心轴线上速度最大。随着热负荷的降低,煤层气和空气输入量减小,速度峰值也逐渐减小。速度衰减主要集中在 -0.4 m $< l < 0.4$ m 范围内;而在 $l > 0.4$ m 或 $l < -0.4$ m 范围内速度值已较小,且衰减较慢。表明燃烧主要集中在 -0.4 m $< l < 0.4$ m 范围内的炉膛中心处。随着炉膛位置后移,速度峰值减小。100% 负荷下,速度峰值由 0.5 m 位置处的 52.6 m/s 下降到 1.5 m 位置处的 26.2 m/s。

4.2 温度特性

图 6、图 7 为 50%、100% 热负荷下炉膛中心轴线上的温度变化。模拟结果表明:50% 负荷下,在 $L=0.6$ m 处达到最高温度 1 698 K;100% 负荷下,在 $L=0.8$ m 处达到最高温度 1 775 K。即随着热负荷的增加,炉内最高温度后移。50%、100% 热负荷下模拟与试验结果的最大偏差均发生在

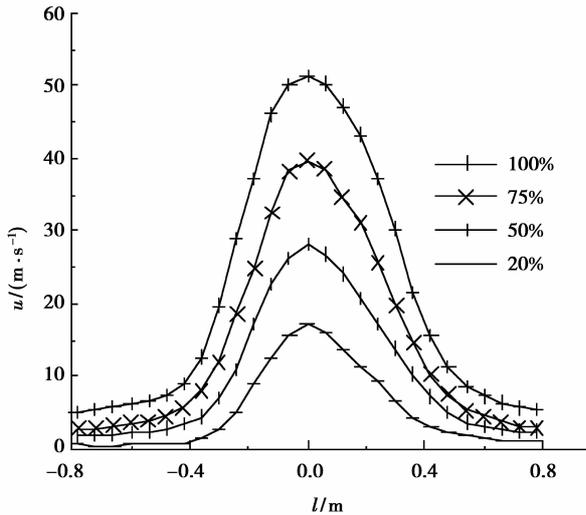


图 4 $z=0.5\text{ m}, h=0.5\text{ m}$ 处沿炉膛宽度方向的速度分布

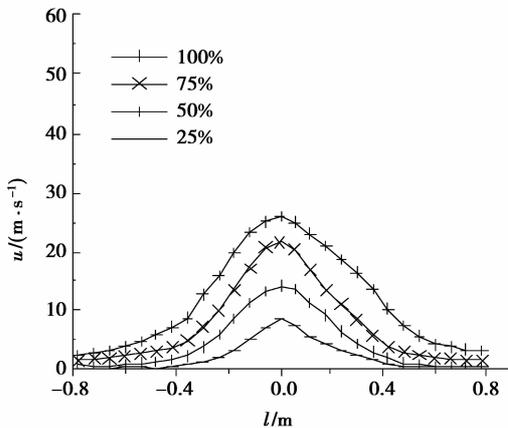


图 5 $z=1.5\text{ m}, h=0.5\text{ m}$ 处沿炉膛宽度方向的速度分布

$L=0.2\text{ m}$ 处, 最大温度偏差分别约为 82 K 和 96 K。热负荷增加时, 模拟与试验结果的温度偏差有所增大, 但整体上两者吻合较好。

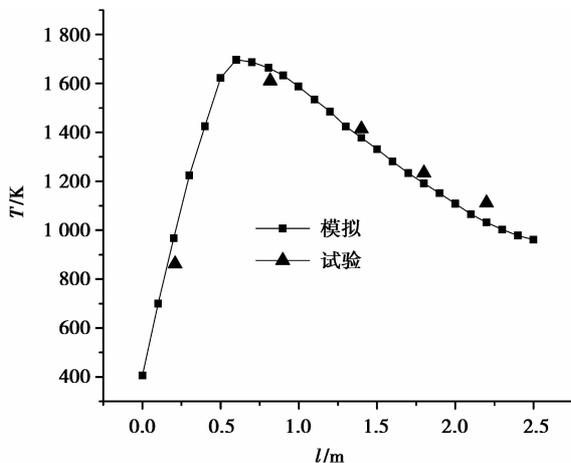


图 6 50% 负荷下沿炉膛中心轴线上温度分布

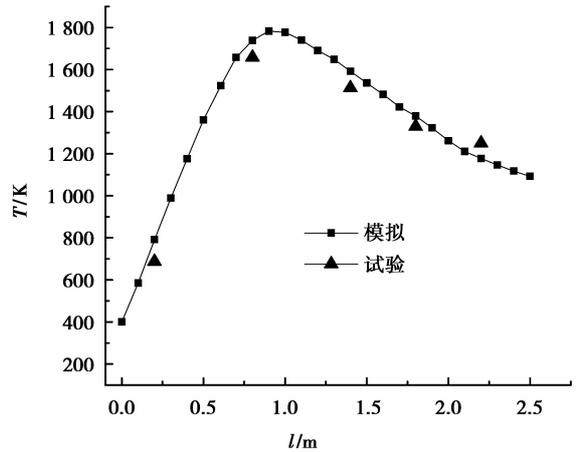


图 7 100% 负荷下沿炉膛中心轴线上温度分布

图 8、图 9 为炉膛轴向 $z=0.5\text{ m}$ 、 $z=1.5\text{ m}$ 处, 高为 0.5 m 时不同热负荷下沿炉膛宽度方向温度分布。图 8 表明 25%、50%、75% 3 种热负荷下温度呈现较为明显的双峰分布。这是由于低负荷下, 流量较小, $z=0.5\text{ m}$ 截面处中心区域处于射流核心区内, 煤层气和空气没能充分混合, 火焰中心氧浓度较低, 燃烧不完全, 中心区域温度相对稍低, 故呈双峰分布趋势。而 100% 热负荷下炉膛内流速较高, 煤层气和空气混合较充分, 中心区域燃烧充分, 温度最高, 因此温度呈中心区域高、两边低的单峰分布。热负荷越小, 温度越低, 呈双峰分布的趋势越明显。图 9 可以看出, 在 $z=1.5\text{ m}$ 炉膛中后部截面处, 4 种热负荷下温度均呈现双峰分布, 且更为明显。这主要是该截面处于炉膛的中后部, 空气量已有所不足, 剧烈的燃烧反应已基本完成, 属于燃烧后的高温烟气区, 由于炉膛后部挡火墙形成的侧回流区作用, 使中心区域外边界附近的温度有所升高, 进而使温度呈现更为明显的双峰分布。

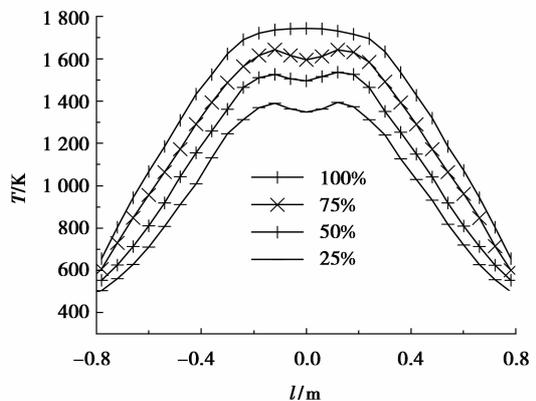
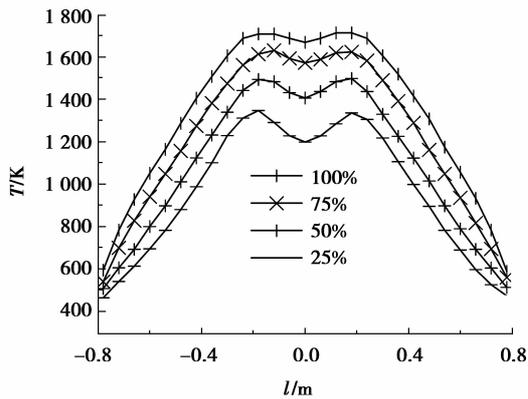
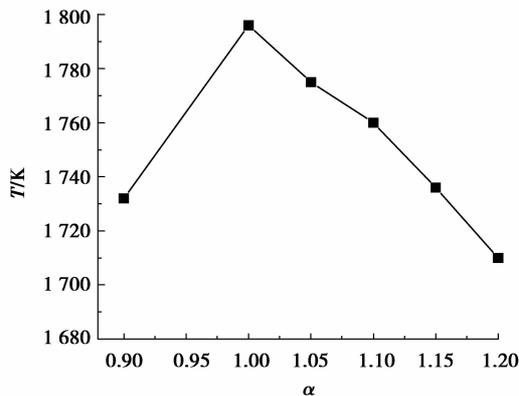


图 8 $z=0.5\text{ m}, h=0.5\text{ m}$ 处沿炉膛宽度方向温度分布

图9 $z=1.5\text{ m}, h=0.5\text{ m}$ 处沿炉膛宽度方向的温度分布

过量空气系数 α 直接会影响到进入炉膛内部的冷流体流量,在燃料量一定时, α 必然会对炉内的温度产生影响。图 10 为 100% 热负荷下,炉内最高温度随 α 的变化。 $\alpha=1.0$ 时炉内最高温度最大,达到 1796 K。当 α 偏离 1.0 时,最高温度都有降低趋势。 $\alpha=1.05, 1.10, 1.15$ 和 1.20 时,炉内最高温度分别降低到 1775、1760、1735、1710 K。由于 α 增大,更多的冷空气进入炉膛并带走更多的热量,使整个炉膛的温度水平降低。在锅炉实际运行中,为使燃料能够燃烧完全,通常选取的 α 均大于 1.0,由图 10 可知, α 最佳值为 1.05 时,可使燃料较为充分的燃烧,也不致使炉内温度降低过多。

图 10 炉内最高温度随 α 的变化

炉膛出口烟温是锅炉设计和运行中的重要参数。实验中利用热电偶测量炉膛出口的烟温,图 11 为过量空气系数为 1.05 时,炉膛出口烟温随热负荷的变化。随热负荷的增加,炉膛出口烟温近似成线性增加,但实验测量烟温略低于模拟值,最大温度偏差为 23 K。这是由于模拟时忽略了漏风等因素的影响导致模拟值偏大,另外热电偶测温的辐射传热方式、热电偶表面的积灰以及热电偶插入的相对深

度都会形成一定的测量误差。

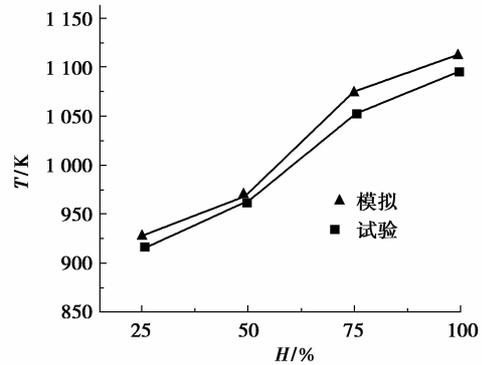


图 11 炉膛出口烟温随热负荷的变化

4.3 NO_x 排放特性

图 12、图 13 分别为 50%、100% 热负荷下,煤层气和空气入口温度均为 293 K 时,NO_x 排放浓度和炉内温度沿炉膛轴线方向的分布。从中可以看出,在炉膛中后部的高温区域 NO_x 排放浓度快速增加,尤其是在 $z>0.5\text{ m}$ 后急剧增加,为 NO_x 的主要生成区,且 NO_x 排放浓度的峰值位置远滞后于温度峰值。热负荷增大时,炉膛平均温度也增加,NO_x 排放浓度也有所升高,温度峰值和 NO_x 排放浓度峰值均后移。50% 负荷下,最高温度出现在 $z=0.6\text{ m}$ 处,峰值为 1698 K,而 NO_x 排放浓度峰值出现在 $z=1.8\text{ m}$ 处,峰值为 59 mg/Nm³。100% 负荷下,最高温度出现在 $z=0.8\text{ m}$ 处,峰值为 1775 K,然而 NO_x 排放浓度峰值出现在 $z=2.1\text{ m}$ 处,峰值为 60 mg/Nm³。

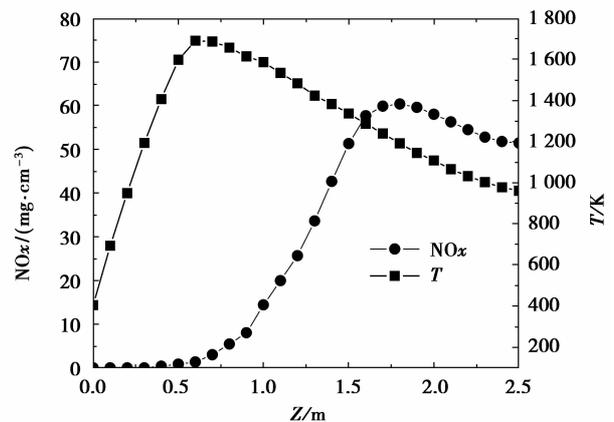
图 12 50% 热负荷下炉内温度与 NO_x 排放浓度在轴线方向的分布

图 14 为 100% 热负荷下,煤层气和空气入口温度为 293 K 时,炉内最高温度与 NO_x 排放浓度随过量空气系数 α 的变化。随着 α 的增大,炉内最高温

度与 NO_x 排放浓度均先增大后减小。这是由于生成的 NO_x 主要为热力型 NO_x , 其排放浓度随温度增加而增加。 α 较小时, 炉膛温度低, NO_x 排放浓度自然也就少。当 $\alpha=1.15$ 时, NO_x 排放浓度达到最大值 $76 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ 。但当 $\alpha>1.15$ 时, 过多的空气量带走了更多的热量, 炉膛温度降低, 使 NO_x 排放浓度又减少。为使燃烧充分 α 通常大于 1.0, 因此可在 $1.00<\alpha<1.15$ 之间时, 找到最佳过量空气系数 ($\alpha=1.05$), 使得燃烧充分, 火焰温度较高, NO_x 排放浓度也较小。

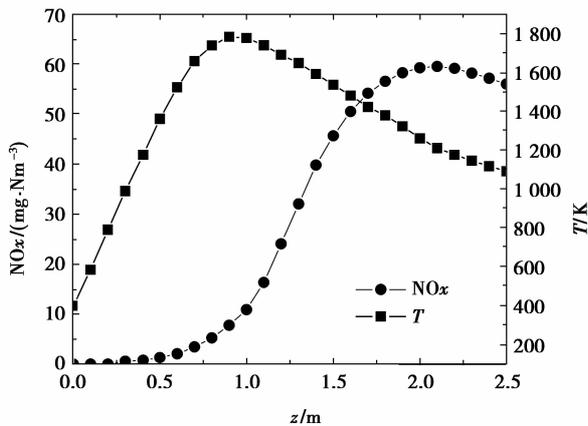


图 13 100%热负荷下炉内温度与 NO_x 排放浓度在轴线方向的分布

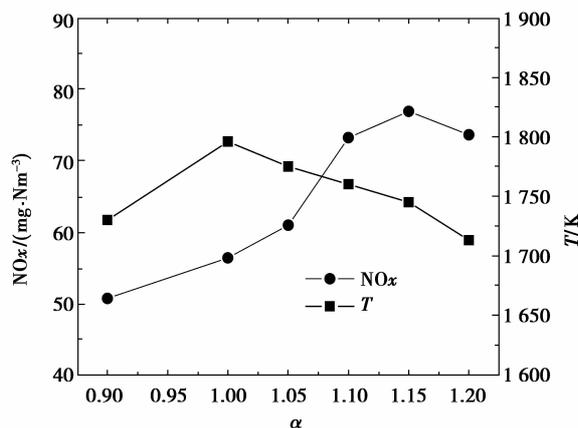


图 14 炉内最高温度与 NO_x 排放浓度随 α 的变化

5 结 论

1) 速度在炉膛轴向距喷口 0.5 m 附近达到最大值, 沿炉膛宽度方向速度均呈中间高两边低的对称分布, 且随负荷降低及炉膛位置的后移, 速度峰值逐渐降低。速度在炉膛宽度方向上的衰减主要集中在 $-0.4 \text{ m}<l<0.4 \text{ m}$ 范围内。

2) 随热负荷的增加, 炉膛轴线上最高温度后移, 模拟与试验结果吻合较好。 $z=0.5 \text{ m}$ 截面处沿炉膛宽度方向, 25%、50%、75% 3 种热负荷下温度呈现较为明显的双峰分布, 而 100% 热负荷下呈单峰分布。在炉膛中后部 $z=1.5 \text{ m}$ 截面处, 4 种热负荷下温度均呈现双峰分布, 且更为明显。

3) 过量空气系数为 1.00 时炉内最高温度最大, 偏离 1.0 时, 最高温度都有降低趋势。过量空气系数为 1.05 时较为适宜。随着热负荷的增加, 炉膛出口烟温近似成线性增加, 但实验测量烟温略低于模拟值, 最大温度偏差为 23 K。

4) 炉膛中后部的高温区域为 NO_x 主要生成区, 且 NO_x 排放浓度峰值位置远滞后于温度峰值。热负荷增大, 温度峰值和 NO_x 排放浓度峰值均后移。过量空气系数的增大, 炉内最高温度与 NO_x 排放浓度均先增大后减小。当过量空气系数为 1.15 时, NO_x 排放浓度达到最大值。当过量空气系数为 1.05 时较佳, 燃料充分燃烧, 火焰温度较高, NO_x 排放浓度也较小。

参考文献:

- [1] 欧春华, 李蜀庆, 张军, 等. 重庆市煤改气及其环境效益分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2004, 27(11): 100-104.
OU CHUN-HUA, LI SU-QING, ZHANG JUN, et al. Boiler transforming from using coal into using natural gas in Chongqing and analysis of its environmental benefits [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(11): 100-104.
- [2] SU S, AGNEW J. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane [J]. Fuel, 2006, 85(9): 1201-1210.
- [3] 郭建兰, 杜少俊. 低热值气体燃料的燃烧特性分析[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(3): 303-306.
GUO JIAN-LAN, DU SHAO-JUN. Analysis on the combustion characteristics of low-heat-value gas fuel [J]. Journal of taiyuan University of Technology, 2009 40(3): 303-306.
- [4] 陈艳容, 张力, 冉景煜, 等. 煤层气与煤矸石在循环流化床内混烧影响因素的试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1374-1378.
CHEN YAN-RONG, ZHANG LI, RAN JING-YU, et al. Experiment key factors of coal-bed gas and coal gangue co-combustion in circulating fluidized bed [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10):

- 1374-1378.
- [5] 杨雄,刘应书,李永玲,等. 基于活性炭的真空变压吸附提浓煤层气甲烷的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6):987-991.
YANG XIONG, LIU YING-SHU, LI YONG-LING, et al. The experimental study on upgrade of coalmine gas by vacuum pressure swing adsorption with activated carbon[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 987-991.
- [6] 冯大强,杨灵,屈成泽,等. WP6 发动机改 RF031 燃气轮机中低热值燃烧室改进设计[J]. 航空发动机, 2010, 36(1):14-19
FENG DA-QIANG, YANG LING, QU CHENG-ZE, et al. Improved design of low/middle calorific combustor for RF031 gas turbine derived from WP6 [J]. Aeroengine, 2010, 36(1):14-19.
- [7] 蒋利桥,赵黛青,汪小慈,等. 壁面渗透燃烧微燃烧器结构参数优化实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(7):1257-1259.
JIANG LI-QIAO, ZHAO DAI-QING, WANG XIAO-HAN, et al. Experiment study on structure parameter optimizing of micro-combustor with penetration combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7):1257-1259.
- [8] NOIRAY N, DUROX D, SCHULLER T, et al. Passive control of combustion instabilities involving premixed flames anchored on perforated plates [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 1283-1290.
- [9] 稽文娟. 燃煤锅炉改烧天然气的研究应用[J]. 能源研究与利用, 2007(1):40-41.
JI WEN-JUAN. Research on coal-burning boiler transforming to burn with gas[J]. Energy Research & Utilization, 2007(1):41-41.
- [10] 邢献军,王宝源,林其钊. 常温空气无焰燃烧在燃煤锅炉煤改气中的应用[J]. 热能动力工程, 2007, 22(3): 284-287.
XING XIAN-JUN, WANG BAO-YUAN, LIN QI-ZHAO. Application of flameless combustion at a normal air temperature for a coal-fired boiler being converted to burn gas[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(3):284-287.
- [11] 章梓雄,董曾南. 黏性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [12] DRYER F L, GLASSMAN I. High temperature oxidation of CO and CH₄ [J]. Symposium (International) on combustion, 1973, 14(1): 987-1003.
- [13] DUPONT V, ZHANG S H, BENTLEY R, et al. Experimental and modelling studies of the catalytic combustion of methane [J]. Fuel, 2002, 81(6): 799-810.
- [14] NISHIOKA M, NAKAGAWA S, ISHIKAWA Y, et al. NO emission characteristics of methane-air double flame [J]. Combust and Flame, 1994, 98(1/2): 127-138.
- [15] 李钧,阎维平,李春燕,等. 基于数值计算的煤粉锅炉 NO_x 释放规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(23):13-19.
LI JUN, YAN WEI-PING, LI CHUN-YAN, et al. Study on NO_x emission characteristics of pulverized coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(23):13-19.
- [16] 王宝源,俞瑜,林其钊,等. 无焰燃烧 NO_x 生成的数值分析和实验研究[J]. 热能动力工程, 2009, 24(6): 787-791.
WANG BAO-YUAN, YU YU, LIN QI-ZHAO, et al. Numerical analysis and experimental study of NO_x generation in flameless combustion [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2009, 24(6):787-791.
- [17] 张代生,张力,蒲舸,等. 燃煤锅炉改烧煤层气燃烧试验与数值模拟[J]. 煤炭转化, 2010, 33(1):48-51.
ZHANG DAI-SHENG, ZHANG LI, PU KE, et al. Experimental study and numerical simulation on combusting coal-bed methane in coal-fired boiler [J]. Coal Conversion, 2010, 33(1):48-51.

(编辑 陈移峰)