

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201805030

链条炉沼气再燃还原氮氧化物数值模拟与优化

王义德^{1,2}, 孙巧群³, 王华山⁴, 李喜梅¹, 高建民¹, 杜 谦¹, 吴少华¹

(1.哈尔滨工业大学 燃烧工程研究所, 哈尔滨 150001; 2.山东省特种设备检验研究院有限公司, 济南 250101;
3.哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001; 4.燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 为利用废弃沼气作为工业锅炉再燃燃料, 实现对氮氧化物(NO_x)的高效率还原, 达到资源回收和 NO_x 减排的目的. 联用 FLIC 和 FLUENT 软件对工业锅炉床层及炉内燃烧特性进行了模拟, 进而探究了 CH_4/NO 摩尔比、沼气稀释比和沼气喷口布置形式对炉膛内 NO_x 还原的影响. 结果表明: CH_4/NO 摩尔比和两者混合程度是影响 NO_x 还原两大主要因素, 总体上 NO_x 的还原率随着 CH_4/NO 摩尔比和沼气稀释比的增大而升高; 当 CH_4/NO 摩尔比较小时, 影响 NO_x 还原率的主导因素是两者的混合程度; 当沼气稀释到一定程度, 其所具有的动量能够与主气流实现较好混合时, 影响 NO_x 还原率的主导因素是 CH_4/NO 摩尔比; 同时沼气稀释比的增大有利于减小气体不完全燃烧损失; 为实现 NO_x 高效率还原, 再燃沼气喷口宜布置在前墙, 但位置不宜过于偏下. 本文能够为沼气在工业锅炉燃烧及 NO_x 还原的工业应用提供一定的参考.

关键词: 链条锅炉; 氮氧化物; 再燃技术; 数值模拟; 沼气; FLIC

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)01-0052-06

Numerical modeling and optimization of nitrogen oxides reduction by biogas reburning in travelling grate boilers

WANG Yide^{1,2}, SUN Qiaoqun³, WANG Huashan⁴, LI Ximei¹, GAO Jianmin¹, DU Qian¹, WU Shaohua¹

(1. Research Institute of Combustion Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Shandong Special Equipment Inspection Institute Co., Ltd., Jinan 250101, China;
3. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
4. College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: In order to realize the waste biogas recycled as reburning fuel in industrial boilers aims to reduce nitrogen oxides (NO_x) high efficiency, which can achieve resource recovery and NO_x emission reduction. Characteristics of industrial boiler bed and furnace were simulated by combining FLIC and FLUENT software, and the effects of CH_4/NO molar ratio, biogas dilution and biogas nozzles arrangement on in-furnace NO_x emission were investigated. The results showed that the CH_4/NO molar ratio and the degree of mixing between the two were the main factors affecting the reduction of NO_x , and NO_x reduction efficiency increased with CH_4/NO molar ratio and biogas dilution ratio increasing in general. When the CH_4/NO molar ratio was small, the dominant factor influencing NO_x reduction efficiency was the mixture degree of them. When biogas was diluted to a certain degree, which could guarantee possessing sufficient momentum to mix well with the main flow, the dominant factor influencing NO_x reduction efficiency was CH_4/NO molar ratio. At the same time, increasing of biogas dilution ratio was beneficial to reduce the loss of gas incomplete combustion. To realize of NO_x high efficiency reduction, the biomass nozzles should be arranged at the front wall, and the position should not be too low. This paper could provide some reference of biogas for industrial boilers combustion and NO_x reduction.

Keywords: traveling grate combustion boiler; nitrogen oxides; reburning technology; numerical modeling; biogas; FLIC

氮氧化物 (NO_x) 在大气中经过一系列的反应过程易形成酸雨、酸雾和光化学烟雾等^[1-2]. “十三

五”节能减排方案要求到 2020 年, NO_x 排放总量控制在 1 574 万 t 内, 较 2015 年下降 15%^[3]. 我国燃煤工业锅炉 NO_x 排放约占全国总排放量的 15%, 较燃煤电站锅炉相比, 其现行排放法规宽松和管理不规范; 伴随着电站锅炉超低排放的加速实施, 工业锅炉已成为 NO_x 减排的重点与难点^[4].

再燃(燃料分级燃烧)技术是一种高效率、低成本的 NO_x 控制技术, 它利用再燃燃料的还原能力对

收稿日期: 2018-5-XX
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0209805); 国家自然科学基金基金(51506035)
作者简介: 王义德(1990—), 男, 硕士;
高建民(1977—), 男, 教授, 博士生导师;
吴少华(1952—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 高建民, yagjm@hit.edu.cn

主燃区生成的 NO_x 进行还原^[5-6], 常用的再燃燃料有煤粉^[7]、碳氢类 (CH_i) 化合物^[8] 和生物质^[9] 等. 工业锅炉炉内 NO_x 还原技术多为选择性非催化还原 (SNCR)^[10] 和复合燃烧^[11], 及尾部烟道的选择性催化还原法 (SCR)^[12]. 关于碳氢类气体燃料在工业锅炉 NO_x 减排中应用的报道不多, 同时目前存在企业生产废水厌氧发酵产生的沼气 (主要成分为 CH_4) 直接高空燃烧排放现象, 这不仅造成了能源的浪费, 而且燃烧产生的硫氧化物亦影响大气环境. 若将该沼气作为厂用锅炉的再燃燃料, 不仅可实现沼气资源的回收利用, 而且利用其还原能力可对炉内的 NO_x 进行还原, 可降低企业脱硝总投资.

本文联用 FLIC 程序和 Fluent 软件对工业锅炉床层和炉膛空间的燃烧进行了耦合计算, 得出了炉内流场、温度场和物质组分分布的时空特性, 进而探究了 CH_4/NO 摩尔比、沼气稀释比和沼气喷口布置方式对炉内燃烧及 NO_x 还原特性的影响规律, 能够为 CH_i 类气体燃料在工业锅炉中燃烧及还原 NO_x 应用提供一定的参考.

1 数值模型与网格

本文炉膛计算域模型及边界设置见图 1. 该模型为某厂在用锅炉, 其型号为 SHL35-1.6-A II, 炉排有效面积 35.38 m^2 , 上炉膛深度 2.94 m , 宽度 4.68 m , 炉膛高度方向最大值 9.51 m . 炉膛深度、高度和宽度方向坐标分别为 x 、 y 和 z 方向.

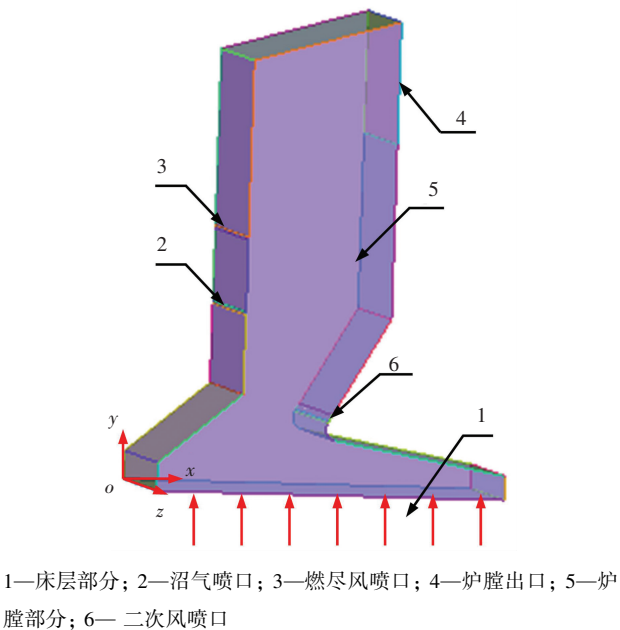


图 1 炉膛计算域模型及边界

Fig.1 Model of furnace computational domain and boundary conditions

在炉膛原结构的基础上, 增设二次风喷口 ($y =$

1.55 m), 沼气喷口 (前墙 $y = 3.0\text{ m}$ 、 $y = 3.6\text{ m}$, 后墙 $y = 3.6\text{ m}$ 三种位置), 燃尽风喷口 (前墙 $y = 5.1\text{ m}$), 以上喷口均沿炉膛宽度方向均布 4 个. 采用 ICEM 软件划分结构化网格, 对各喷口处网格进行局部加密; 在网格无关性检验基础上, 综合考虑计算精度和经济性, 模拟采用网格数为 124 万.

沼气成分的体积分数不断波动, 据现场长时间监测数据, 其变化范围为 CH_4 ($60\sim90\%$)、 H_2S ($0\sim4\%$)、 CO_2 ($5\%\sim25\%$) 和 H_2O ($0\sim5\%$), 模拟中使用的沼气成分数据如表 1 所示.

表 1 模拟使用沼气成分与体积分数			
Tab. 1 Composition and volume fraction of biogas used in numerical simulation			
			%
CH_4	H_2S	CO_2	H_2O
75	4	16	5

2 计算方法与边界条件

2.1 床层与炉膛计算域的耦合

采用 FLIC 和 FLUENT 软件对床层和炉膛进行耦合计算, 该方法的主要思想是通过炉膛-床层交界面将两者计算数据进行交互, 如图 2 所示. 该交界面既为 FLIC 床层计算的气相组分参数的出口边界, 又为 FLUENT 炉膛计算的入口边界; FLUENT 计算输出辐射热量至 FLIC, 为 FLIC 计算提供辐射热量分布. 通过交界面参数的交互, 将两个独立的模型耦合起来对工业锅炉整体燃烧进行模拟. 数据在交界面迭代直至收敛, 该方法的详细介绍及计算准确可靠性可参阅 Yang 等^[13-14] 的文献.

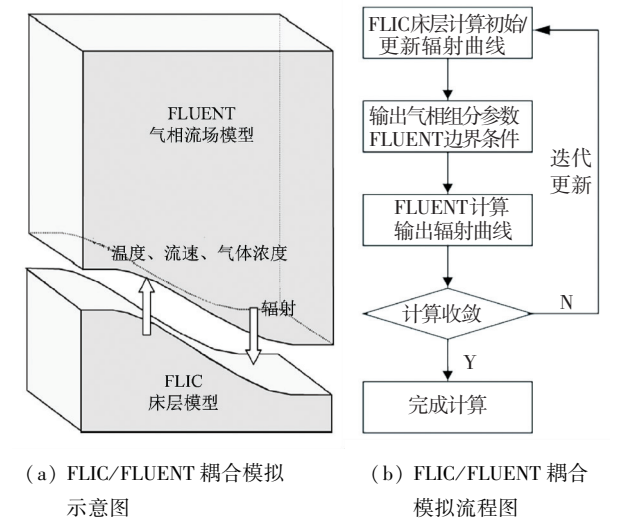


图 2 FLIC/FLUENT 耦合模拟方法及流程图

Fig.2 Combined simulation method and flow process of FLIC/FLUENT

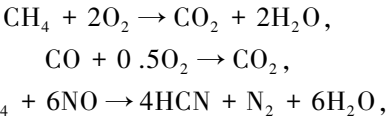
2.2 流动及燃烧模型

炉内湍流流动采用可实现 $k-\varepsilon$ 双方程模型; 气

相组分的燃烧反应采用组分输运模型,辐射采用 P-1 模型^[15];计算方法采用压力-速度耦合的 Coupled 算法,压力项离散采用 PRESTO 格式,其他项采用二阶迎风离散格式。

2.3 边界及计算方法

本文中 CH₄/O₂ 两步反应总包机理、CH₄ 与 NO 反应式及 NO_x 还原率 η_{NO_x} 定义为



$$\eta_{\text{NO}_x} = \frac{f_{\text{NO}_x, \text{对比工况}} - f_{\text{NO}_x, \text{基础工况}}}{f_{\text{NO}_x, \text{基础工况}}}.$$

式中, f_{NO_x} 为 NO_x 质量浓度, mg/m³。

数值模拟的主要边界条件如下:

- 1) 炉膛入口边界条件. 速度进口边界, 气体组分、速度和温度分布为 FLUENT 和 FLIC 软件迭代收敛数据。
- 2) 各喷口边界条件. 速度进口边界, 二次风温 400 K, 其他 300 K。
- 3) 炉膛壁面边界条件. 等温壁面边界, 前拱和后拱 750 K, 其他壁面 500 K, 壁面发射率 0.8; 无滑移壁面。
- 4) 炉膛出口边界条件. 压力出口边界, 出口压力 -20 Pa; 回流温度 1 100 K。

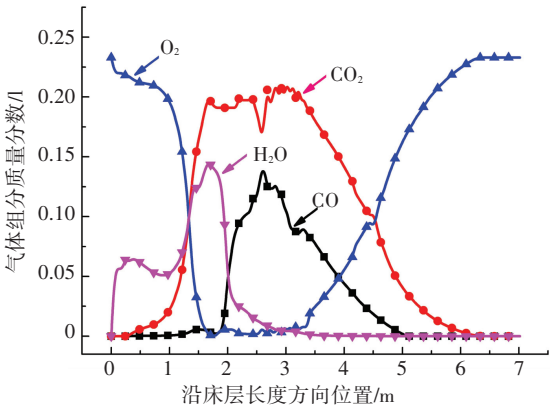
3 结果与分析

3.1 FLUENT 炉膛计算边界条件

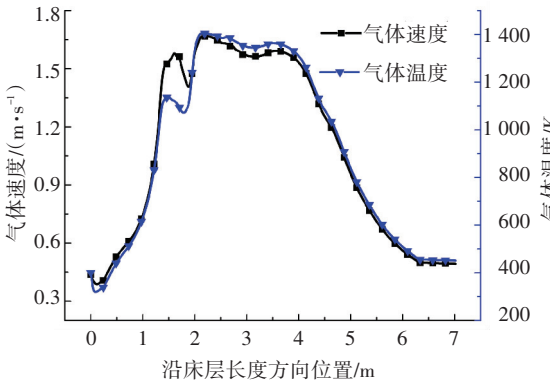
FLUENT 炉膛部分计算的入口边界条件为采用图 2 所示 FLIC/FLUENT 耦合迭代计算方法得到的最终收敛解. 本文省略了中间迭代过程, 最终床层表面气体组分浓度、温度和速度沿床层长度方向分布如图 3 所示。

3.2 基础工况下炉内燃烧

未设沼气及燃尽风喷口工况为基础工况, 该工况下炉膛宽度方向不同截面温度分布如图 4 所示。由 4(a) 图可知, 在炉膛中部位置出现了高温区域, 这是因为床层中未燃尽的可燃性组分(主要为 CO)与床层中原有及二次风新供入的氧气燃烧造成的; 沿炉膛高度方向, 由温度分布云图可知, 可燃组分逐渐燃尽; 到达炉膛出口前, 燃烧已基本完成。对比图 4(b) 知, 二次风的供入有利于对上升气体形成阻碍, 避免气体的直接上升, 增加其在炉内的停留时间; 同时二次风的扰动作用可增强可燃气与氧气的混合, 这两者均有利于可燃气体的燃尽。

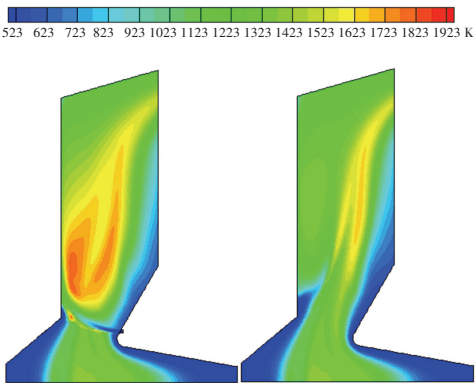


(a) 气体组分质量分数分布



(b) 气体速度和温度分布

图 3 沿床层长度方向气体浓度、速度和温度分布
Fig. 3 Distribution of gas concentration, velocity, and temperature along the bed length



(a) $z = 1.872\text{ m}$ 截面 (b) $z = 2.340\text{ m}$ 截面

图 4 炉内不同截面温度分布

Fig.4 Temperature distribution at different sections
表 2 给出了基础工况下炉膛出口主要参数的面平均值, 作为不同研究变量下的对比值。

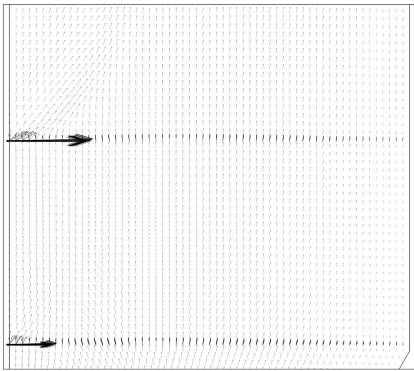
表 2 炉膛出口主要参数

Tab.2 Main parameters at furnace outlet

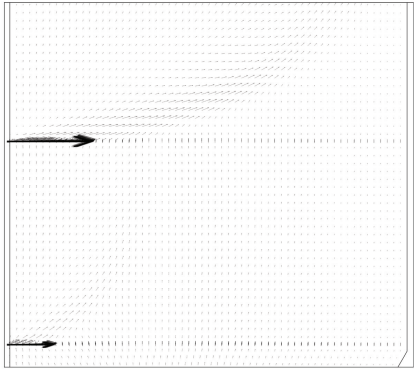
烟温/K	体积流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	O ₂ 体积 分数/%	NO _x 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1 201	47.60	8.62	306.68

3.3 沼气量对燃烧及 NO_x 排放的影响

在沼气量对燃烧及 NO_x 排放影响研究中,研究了 CH₄/NO 摩尔比为 5、10 和 15 下的三种工况,相应沼气流速为 36.12 m/s、72.23 m/s 和 108.35 m/s. 首先对比了 CH₄/NO 摩尔比为 5 和 15 下, z = 1.872 m 截面的流场分布, 详见图 5. 随着 CH₄/NO 摩尔比的增大,沼气和燃尽风量相应增多,即两者的动量增大. 对比图 5(a) 和图 5(b) 可知,在 CH₄/NO 摩尔比为 5 时,沼气和燃尽风在炉膛深度方向入射长度较短,不利于 CH₄ 和 NO_x 的混合. 当两者摩尔比增大至 15 时,沼气及燃尽风入射距离明显增长,这增强了不同气体之间的混合效果.



(a) CH₄/NO 摩尔比为 5



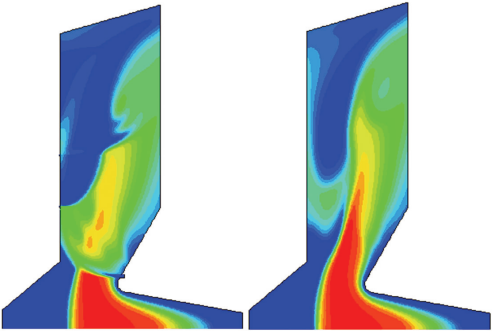
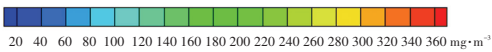
(b) CH₄/NO 摩尔比为 15

图 5 不同 CH₄/NO 摩尔比下 z = 1.872 m 截面流场

Fig.5 Flow fields of z = 1.872 m section at different CH₄/NO molar ratios

图 6 所示为 CH₄/NO 摩尔比为 15 下,截面 z = 1.872 m 和 z = 2.340 m 的 NO_x 浓度分布云图. 对比图 6(a) 和图 6(b) 可知,上升气流在二次风的作用下被吹向前墙处,直接体现为图 6(a) 图中再燃燃料喷口下部 NO_x 的浓度高于图 6(b). 从 NO_x 整体分布可知,在前墙上部位置 NO_x 浓度均较低,这—是由于气体受到炉膛出口负压作用,不能较好充盈整个炉膛;二是由于再燃燃料和燃尽风的进一步阻碍造成的. 由 NO_x 分布云图可知,沼气再燃可明显降

低 NO_x 的排放浓度.



(a) z = 1.872 m 截面 (b) z = 2.340 m 截面

图 6 炉内不同截面 NO_x 质量浓度分布

Fig.6 NO_x mass concentration distribution at different sections

图 7 所示为不同 CH₄/NO 摩尔比下,炉膛出口 NO_x 质量浓度和还原率.

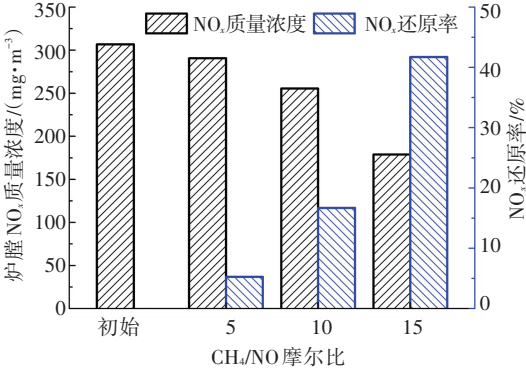


图 7 不同 CH₄/NO 摩尔比下炉膛出口 NO_x 质量浓度及其还原率

Fig.7 NO_x mass concentration and reduction efficiency of furnace outlet at different CH₄/NO molar ratios

由图 7 可知,当 CH₄/NO 摩尔比为 5、10 和 15 时,炉膛出口 NO_x 质量浓度为 291、256 和 179 mg/m³, NO_x 还原率为 5.3%、16.7% 和 41.7%;总体上呈现随着 CH₄/NO 摩尔比的增加, NO_x 还原率升高;但是比较 CH₄/NO 摩尔比从 0 增加至 15 时, NO_x 还原率与相邻前者差值为 5.3%、11.4% 和 25.0%, 即 NO_x 的相对还原率增大. 这是因为 NO_x 还原率的大小一方面取决于 CH₄/NO 的摩尔比,另一方面取决于两者的混合程度;摩尔比的增加,不单单提供了更多的 CH₄ 用于 NO_x 的还原,而且增强了两者的混合的程度,所以在相同 CH₄/NO 摩尔比差值下, NO_x 的相对还原率呈现逐渐增加的趋势.

3.4 沼气稀释比对燃烧及 NO_x 排放的影响

气体组分间的混合程度将影响可燃组分的燃尽率和 NO_x 的还原,保持 CH₄/NO 摩尔比为 10 不变,以 N₂ 为载体将沼气进行稀释,研究了稀释比 (载气 N₂ 与沼气体积比) 为 0.5、1.0 和 1.5 的三种工况. 图

8 所示为不同稀释比下炉膛出口 CO 质量浓度和出口平均烟温,对比工况的稀释比为 0. 由图 8 可知,对比工况的炉膛出口 CO 质量浓度为 124 mg/m^3 ,稀释比为 0.5、1.0 和 1.5 下的 CO 质量浓度为 46 、 33 和 21 mg/m^3 ,相对降低率为 62.9% 、 73.4% 和 83.1% . 当其他条件相同时,载气携带沼气从总体上增加了两者总体动量,实现与原炉膛内气体更好的混合,有利于 CO 燃尽率的提高,减少气体不完全燃烧损失. 炉膛出口平均烟温随着稀释比的增加略有升高,再次证明载气的添加有利于加强气体组分间的扰动混合,减小气体不完全燃烧损失.

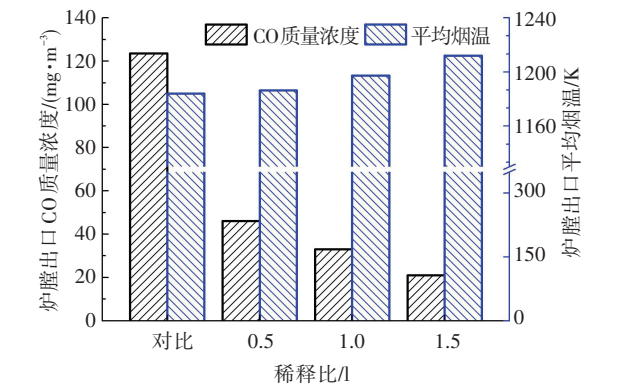


图 8 不同沼气稀释比下炉膛出口 CO 质量浓度和平均烟温
Fig.8 CO mass concentration and average gas temperature of furnace outlet at different biogas dilution ratios

图 9 所示为不同稀释比下炉膛出口 NO_x 质量浓度和还原率. 由图 9 可知,对比工况下炉膛出口 NO_x 质量浓度和还原率为 256 mg/m^3 和 16.7% ;当稀释比为 0.5、1.0 和 1.5 时,炉膛出口 NO_x 质量浓度和还原率为 213 、 180 、 164 mg/m^3 和 30.5% 、 41.4% 、 46.5% . 即沼气流不变时,随着稀释比的增加,NO_x 的还原率增加,但增加的幅度逐渐减小;稀释比为 0.5 和 1.0 的工况下 NO_x 还原率增加幅度较大,这是由于 NO_x 还原率主要受 CH₄ 和 NO_x 混合程度的影响,稀释比的增大有利于两者的混合,提高了 NO_x 还原率;而后期 NO_x 还原率增加幅度变缓,说明该工况下两者混合程度不再是影响 NO_x 还原率的主导因素.

3.5 沼气喷口布置对炉内燃烧及 NO_x 排放的影响

炉膛内不同位置的流场分布、O₂ 浓度和温度等均不同,同时沼气和燃尽风喷口的相对位置亦影响再燃区及燃尽区的长度. 为探究再燃燃料喷口布置对 NO_x 排放的影响,在不改变燃尽风喷口位置的前提下,对沼气喷口布置在前墙 $y = 3.0\text{ m}$ 、 $y = 3.6\text{ m}$ 和后墙 $y = 3.6\text{ m}$ 处的三种型式进行了比较,分别定义为型式 1、2 和 3,其中 CH₄/NO 摩尔比为 10,沼气稀释比为零. 图 10 所示为不同沼气喷口布置型式下炉膛出口 NO_x 质量浓度和还原率.

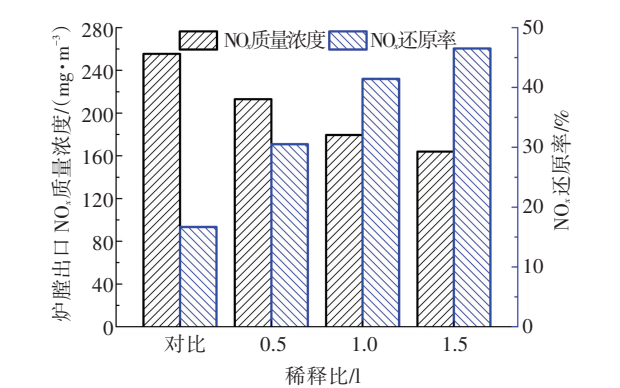


图 9 不同沼气稀释比下炉膛出口 NO_x 质量浓度和还原率
Fig.9 NO_x mass concentration and reduction efficiency of furnace outlet at different biogas dilution ratios

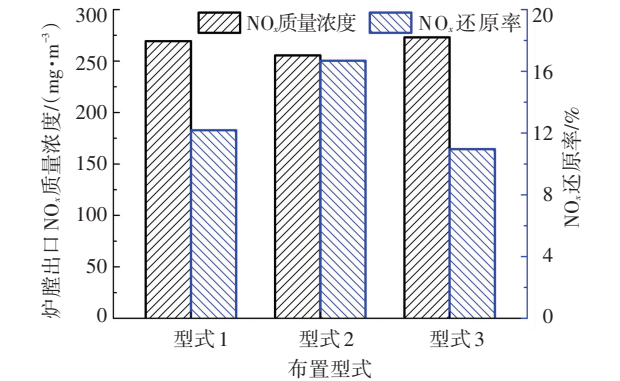


图 10 不同沼气喷口布置型式下炉膛出口 NO_x 质量浓度和还原率
Fig.10 NO_x mass concentration and reduction efficiency of furnace outlet at different biogas nozzle arrangement

由图 10 可知,型式 1-3 下炉膛出口 NO_x 质量浓度为 269 、 256 和 273 mg/m^3 , NO_x 还原率为 12.2% 、 16.7% 和 11.0% . 由上述数据可知,再燃燃料喷口布置型式 2 较型式 1、3 更有利于 NO_x 的还原,布置型式 1、3 对 NO_x 排放影响区别不大.

为了说明再燃燃料喷口布置型式对 NO_x 排放影响原因,绘制了不同沼气喷口布置型式下 $z = 1.872\text{ m}$ 截面的 NO_x 浓度分布云图及流线图,如图 11 所示. 由图 11 可知,对比布置型式 2 将沼气喷口下移(型式 1),喷口中心截面的面积减小,从而相应的主气流流速增大,使得具有相同动量的再燃燃料在主气流中的贯穿距离减小,不利于 CH₄ 与 NO_x 的混合与反应,从图 11(a)中流线可说明此点;其次该处 O₂ 浓度较布置型式 2 下高,即反应气氛的还原性较弱,有利于 CH₄ 的氧化反应而非其与 NO_x 的还原反应,以上两点共同作用使得该布置型式下的 NO_x 排放浓度较型式 2 高. 布置型式 3 下,后墙喷口所在区域为回流区,非主流流的流动区域,不利于再燃燃料与主流流的混合;同时由 NO_x 浓度分布云图可知,该区域 NO_x 的浓度较小;再者此处靠近炉膛出口,在出口负压与主流流的共同作用下,该处气流更

易进入尾部烟道,图 11(b)中流线亦可说明此点,该布置型式下的 NO_x 排放浓度亦较高. 综上,再燃燃料喷口宜布置在前墙,但位置不宜过于偏下.

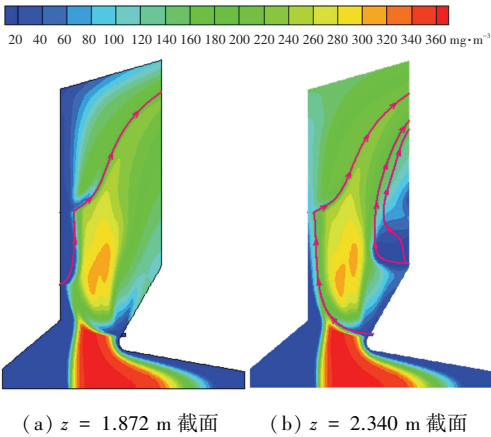


图 11 不同沼气喷口布置型式下 $z=1.872\text{ m}$ 截面 NO_x 分布云图及流线

Fig.11 NO_x distribution and flow line of $z = 1.872\text{ m}$ section at different biogas nozzle arrangement

4 结 论

- 1) NO_x 的还原率随着 CH_4/NO 摩尔比的增大而增大,当两者比值为 5、10 和 15 时, NO_x 还原率为 5.3%、16.7% 和 41.7%.
- 2) NO_x 还原率随着沼气稀释比的增大而增大,在 CH_4/NO 摩尔比为 10 下,当再燃燃料稀释比为 0.5、1.0 和 1.5 时, NO_x 还原率 30.5%、41.4% 和 46.5%.
- 3) 当 CH_4/NO 摩尔比较小时,影响 NO_x 还原率的主导因素是两者的混合程度;当再燃燃料稀释到一定程度,其所具有的动量能保证与主气流较好混合时,影响 NO_x 还原率的主导因素是 CH_4/NO 摩尔比.
- 4) 再燃燃料喷口宜布置在前墙,但位置不宜过于偏下.

参考文献

[1] LIU C, HUI S, ZHANG X, et al. Influence of type of burner on NO emissions for pulverized coal preheating method[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 278. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.03.081

[2] SHU Y, WANG H, ZHU J, et al. An experimental study of heterogeneous NO reduction by biomass reburning[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 132: 111. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.12.039

[3] 吴智鹏, 毛奔升. 火电厂超低排放脱硝控制策略优化研究与实践[J]. 锅炉制造, 2016(3): 1

WU Zhipeng, MAO Yisheng. Research and practice on DeNO_x control strategy of ultra low emission in thermal power plant[J]. Boiler Manufacturing, 2016 (3): 1

[4] 李俊东, 韩殿营, 李耀荣, 等. 在用燃煤链条炉排锅炉的节能改造[J]. 工业锅炉, 2010(2): 20. DOI: 10.16558/j.cnki.issn1004-

8774.2010.02.016

LI Jundong, HAN Dianying, LI Yaorong, et al. Energy-saving renovation of coal-fired boilers with chain grates in use[J]. Industrial Boiler, 2010(2): 20. DOI: 10.16558/j.cnki.issn1004-8774.2010.02.016

[5] CASACA C, COSTA M. Detailed measurements in a laboratory furnace with reburning[J]. Fuel, 2011, 90(3): 1090. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.12.020

[6] KIM H Y, BAEK S W, KIM S W. Investigation of fuel lean reburning process in a 1.5 MW boiler[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 183. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.05.027

[7] GAO Z, YAN W, FANG L, et al. Coal consumption for NO reduction in the coal reburning process in an entrained flow reactor[J]. Energy Sources, 2014, 36(10): 1141. DOI: 10.1080/15567036.2010.544008

[8] SMOOT L D, HILL S C, XU H. NO_x control through reburning[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1998, 24(5): 385. DOI: 10.1016/S0360-1285(97)00022-1

[9] 韩奎华, 刘志超, 高攀, 等. 生物质再燃脱硝特性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(5): 570. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2008.05.021

HAN Kuihua, LIU Zhichao, GAO Pan, et al. Experimental study on characteristics of nitrogen oxides reduction by biomass reburning[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 570. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2008.05.021

[10] BROUWER J, HEAP M P, PERSHING D W, et al. A model for prediction of selective noncatalytic reduction of nitrogen oxides by ammonia, urea, and cyanuric acid with mixing limitations in the presence of CO[J]. Symposium on Combustion, 2015, 26(2): 2117. DOI: 10.1016/S0082-0784(96)80036-1

[11] 赛庆毅, 严浩文, 张忠孝, 等. 链条锅炉复合燃烧炉内特性的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(9): 63. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.09.0011

SAI Qingyi, YAN Haowen, ZHANG Zhongxiao, et al. Numerical simulation of in-furnace compound combustion characteristics of a chain grate boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(9): 63. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.09.0011

[12] 冯淑娟. 工业锅炉脱硝技术经济分析及模糊综合评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013

FENG Shujuan. The techno-economic analysis and the fuzzy comprehensive evaluation of the denitration in industrial boilers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013

[13] YANG Y B, SWITENBANK J. Mathematical modelling of particle mixing effect on the combustion of municipal solid wastes in a packed-bed furnace[J]. Waste Management, 2008, 28(8): 1290. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.04.012

[14] YANG Y B, NEWMAN R, SHARIFI V, et al. Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions[J]. Fuel, 2007, 86(1/2): 129. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.06.023

[15] SONG M, ZENG L, CHEN Z, et al. Industrial application of an improved multiple injection and multiple staging combustion technology in a 600 MWe supercritical down-fired boiler[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(3): 1604. DOI: 10.1021/acs.est.5b03976