

高温低氧燃烧过程中 NO_x 排放规律研究

钟水库¹, 马宪国¹, 赵无非², 眭向荣²

(1. 上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海*第七一一研究所 热能工程部, 上海 200011)

摘 要: 对高温低氧燃烧过程中 NO_x 的排放规律进行了实验研究, 得到了在不同预热空气温度和不同预热空气含氧量条件下, NO_x 的排放规律。同时利用 CFD 通用软件对高温低氧燃烧过程 NO_x 的排放浓度进行了数值计算, 获得了一些规律性的关系。

关 键 词: 高温空气燃烧; NO_x 排放; 实验研究; 数值计算

中图分类号: TK16 文献标识码: A

1 引 言

高温低氧燃烧技术 (HTAC) 是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型燃烧技术。该技术有效地抑制了燃烧污染物 NO_x 的生成与排放, 如使用天然气 (甲烷) 为燃料时, 能使 NO_x 的排放浓度从 600~700 mg/kg 下降到 30~40 mg/kg, 因此在发达国家得到了广泛的重视^[1~4]。

国外学者对高温低氧燃烧技术开展了系列的研究^[5~9], 并取得了显著成就。我国的高温低氧燃烧技术研究起步不久, 许多方面尚在探索阶段, 特别是直接利用烟气稀释预热空气而形成高温低氧条件的方法尚缺少工业性实验研究。本文采用炉膛烟气外循环方法对预热空气进行稀释, 形成低氧燃烧条件, 并对不同工况燃烧过程的 NO_x 排放浓度进行了实验测试。

2 实验台设计

实验用燃烧炉的结构见图 1, 分为预热系统和高温低氧燃烧系统。预热系统的作用是在高温低氧燃烧系统工作之前对燃烧炉进行预热, 当炉内温度达到 1 000 °C 左右时即关闭。燃烧炉为 3.5 m×3 m×2 m 的长方体, 燃烧烟气经由蜂窝陶瓷蓄热室排出时对蓄

热体进行加温, 使之温度达到 1 000 °C 以上, 再由蜂窝陶瓷蓄热体对空气进行加热使之成为高温空气, 预热空气和气体燃料均可通过蝶阀来控制其流量, 左右两组燃烧器通过四通换向阀切换, 交替进行工作。通过抽取部分燃烧烟气稀释预热空气以实现低氧燃烧, 烟气的流量可通过蝶阀调节, 以得到不同含氧浓度的低氧预热空气。

3 实验目标

实验所用的燃料为城市管道煤气, 其组分是: 一氧化碳 (CO) 38.9%、氢气 (H₂) 48%、甲烷 (CH₄) 0.5%、二氧化碳 (CO₂) 6%、氮气 (N₂) 6.3% 和氧气 (O₂) 0.2%, 燃气热值: 10.3 MJ/m³。

本次实验的目标是得到在不同的预热空气温度和含氧量的条件下, 燃烧过程中 NO_x 排放浓度的变化规律。实验用镍硅热电偶测量预热空气的温度, CCD 火焰检测系统监测燃烧过程, 数字烟气分析仪测量燃烧烟气中的化学组分。各测量点均与计算机相连, 采用巡检监测和实时处理。

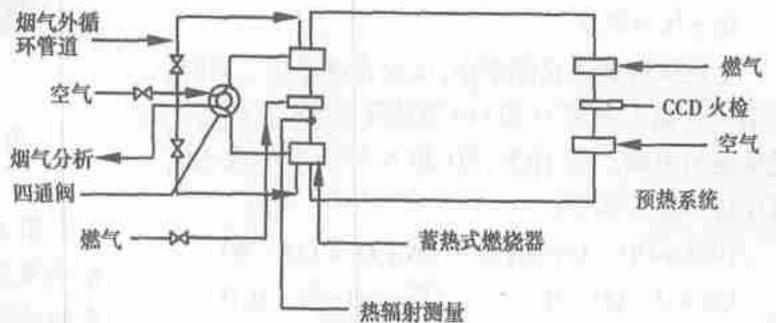


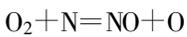
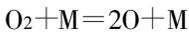
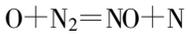
图 1 高温低氧燃烧实验台结构简图

4 数值计算

4.1 NO_x 的生成模型

燃烧过程所产生的 NO_x 主要是由热力型、快速型和燃料型所组成。由于所用燃料中氮的含量不高, 并且燃烧过程中所产生的 NO_x 中 NO 占 95% 以上, 因此在本文中, 只计算高温低氧燃烧过程中所产生的热力型 NO 和快速型 NO。

热力型 NO 的化学反应方程式如下:



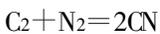
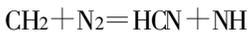
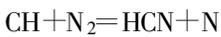
热力型 NO 的浓度计算按 Zeldovich 机理计算:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 3 \times 10^{14} [N_2] [O_2]^{1/2} \exp(-542000/RT) \quad (1)$$

式中: [O₂]、[N₂] 和 [NO] 分别为 O₂、N₂ 和 NO 的浓度; T—绝对温度; t—时间; R—通用气体常数。

除了热力型 NO 外, 碳化氢系列燃料在氧浓度过低的条件下进行燃烧时, 在火焰面上生成的 NO 称为快速型 NO, 火焰中的 HCN 和 NH_i 的存在对快速型 NO 的生成起主要作用。

快速型 NO 的生成机理与热力 NO 不同, 按照芬尼摩尔(Fenimore)的观点^[10] 碳氢化合物燃烧时, 分解生成 CH、CH₂ 和 C₂ 等基团, 它们会破坏空气中 N₂ 分子键, 其反应方程式如下:



上述反应的活化能很小, 反应速度很快。同时, 火焰中生成大量的 O 和 OH 等原子基团, 它们与上述反应的中间产物 HCN、NH 和 N 等反应生成 NO, 其反应方程式如下:



快速型 NO 的生成量与燃烧时单位体积内的碳原子数成比例, 而与碳氢化合物本身无关。影响快速型 NO 生成量主要为碳氢化合物燃料裂解出来的 CH 和 CH₂ 所参与的化学反应, 从这方面来考虑, 快速型 NO 生成速率的控制方程可以由下式来描述:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k [CH_x] [H_2] \quad (2)$$

这里: $k = 3.0 \times 10^{11} \exp(-13600/RT)$

4.2 计算条件

在实验的基础上, 利用 CFD 通用软件对各个实验工况进行了数值计算。根据实验测得的参数, 设定了气体燃料的喷入速度, 预热空气的喷入速度, 燃料组分等。

5 实验和计算结果分析

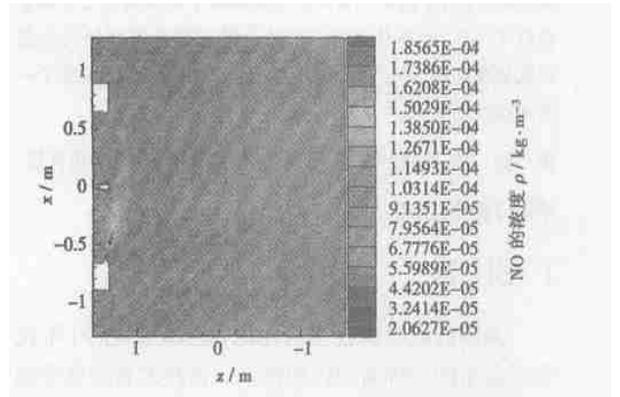


图 2 T=1000 °C、L=21% 时 NO 分布

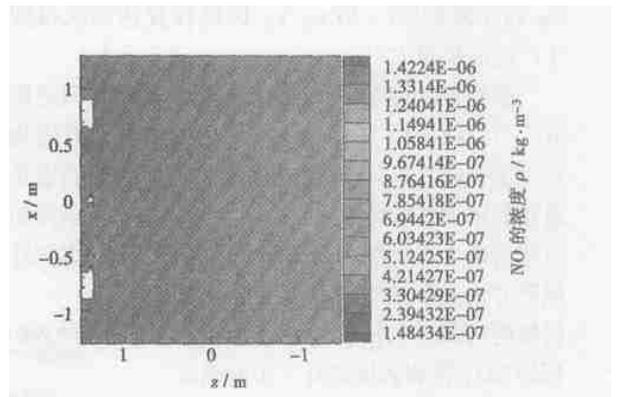


图 3 T=1000 °C、L=15% 时 NO 分布

图 2~图 5 分别显示了当预热空气温度为 1273 K, 含氧量为 21%、15%、9% 和 3% 时燃烧炉内 NO 分布的计算机模拟结果。从图中可以看出, NO 浓度最高处是在燃烧火焰的高温区附近, 当预热空气中的含氧量为 21% 时, 燃烧炉内 NO 的最高浓度为 185.6 mg/m³; 而当含氧量降为 9% 时基本上很少有 NO 生成。随着预热空气含氧量的下降, 燃料的燃烧温度和炉膛温度大幅降低, 从而有效地抑制了 NO 的生成与排放。

图 6 是当预热空气温度 (T) 为 1000 °C 时, NO

排放浓度随预热空气含氧量(L)变化的实验结果。

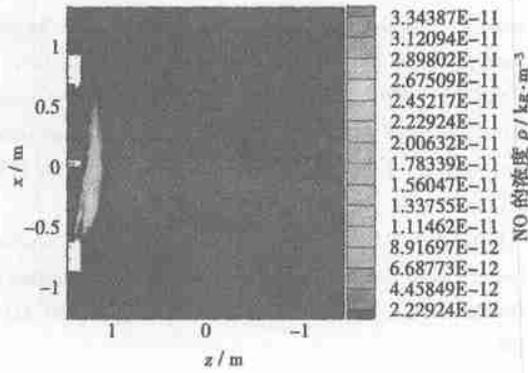


图 4 T=1 000 °C、L=9%时 NO 分布

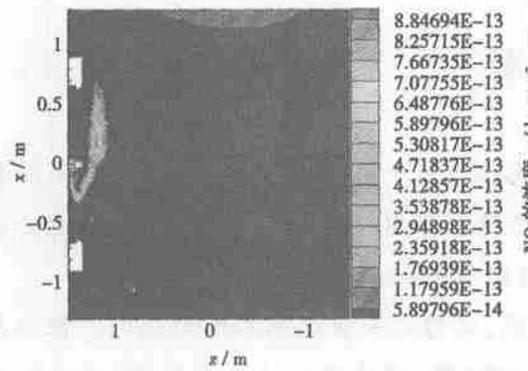


图 5 T=1 000 °C、L=3%时 NO 分布

图 7 是当预热空气含氧量为 21% 时, NO 排放浓度随预热空气温度(T)变化的实验结果。

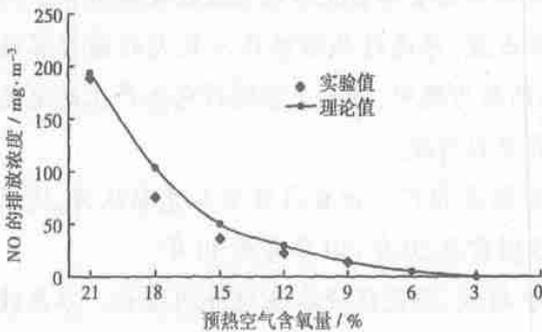


图 6 NO 的排放浓度与预热空气含氧量之间的关系

从图 6 和图 7 中(理论计算按理想化学当量比进行计算, 烟气分析仪测试的实验数据按 O₂ 浓度为 6% 折算), 我们可以看出: 在高温低氧燃烧过程中, 当预热空气温度保持不变, 而预热空气中的含氧量

从 21% 降低到 9% 时, 烟气中 NO 的排放浓度从 190 mg/m³ 减少到 14 mg/m³。当预热空气中的含氧量保持不变, 而预热空气温度从 1 000 °C 下降到 700 °C 时, 烟气中 NO 的排放浓度则从 190 mg/m³ 减少到了 47 mg/m³。在相同预热空气温度的条件下, 随着预热空气中含氧量的下降, 燃料的燃烧温度逐步降低, 炉膛内的平均温度也相应下降并分布趋于均匀, 不存在局部高温区域, 从而抑制了热力型和快速型 NO 的生成。而预热空气温度的下降同样引起燃料的燃烧温度以及炉膛温度的降低, 使得 NO 的排放浓度减少。

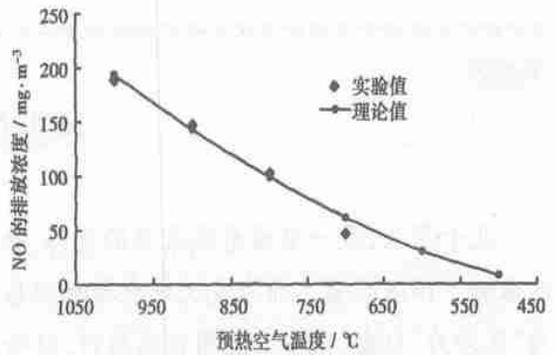


图 7 NO 的排放浓度与预热空气温度之间的关系

6 结 论

通过对高温低氧燃烧过程中 NO 排放规律的实验研究和数值计算, 可以得到以下的结论:

- (1) 高温低氧燃烧过程中污染物 NO 的生成与排放浓度随着预热空气温度的下降而下降, 随着预热空气中含氧量的下降而下降。
- (2) 采用气体燃料的高温低氧燃烧过程, NO 的生成与排放受燃料燃烧温度和炉膛内温度场分布的影响极大, 而预热空气温度和含氧量又往往控制着燃烧过程的温度水平和炉膛内的温度场分布。因此, 这两个因素对 NO 的生成与排放产生了重要影响。

参考文献:

[1] 周怀春. 高温空气燃烧技术—21 世纪关键技术之一[J]. 工业炉, 1998(1): 19—27.
 [2] 马宪国, 郑国耀. 高温低氧燃烧技术的研究与应用[J]. 动力工程, 2001, 21(1): 1065—1068.
 [3] SOBIESIAK A. Performance characteristic of the novel low-NO_x CGRI burner for use with high air pre-heat[J]. Combustion and Flame.

- 1998, **115**:93—125.
- [4] FLAMME M. Low NO_x combustion technologies for high temperature applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, **42**: 1919—1935.
- [5] HONGSHENG G. Numerical study of NO_x emission in high temperature air combustion[J]. *JSME International Journal Series B*, 1998, **41**(2):134—221.
- [6] CHOI G, KATSUKI M. Advanced low NO_x combustion using highly preheated air [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, **42**: 639—652.
- [7] HASEGAWA T, TANAKA R. High temperature air combustion-revolution in combustion technology[J]. *JSME International Journal Series B*, 1998, **41**(4): 1079—1084.
- [8] YUAN J, NARUSE I. Modeling of combustion characteristics and NO_x emission in high preheated and diluted air combustion [J]. *International Journal of Energy Research Res*, 1998, **22**: 1217—1234.
- [9] TOSHIKI H, RYOICHI T. High temperature air combustion-revolution in combustion technology (part 1 new findings on high temperature air combustion)[J]. *JSME International Journal Series B*, 1998, **41**(4): 524—541.
- [10] LEVY JM, CHAN LK, SAROFIM A, *et al.* NO reactions at pulverized coal flame conditions[A]. *18th International Symposium on Combustion*[C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1981. 111—120.

· 新能源 ·

冰岛的氢能源

几十年来, 氢一直被看成未来的能源, 如今冰岛正在进行一场变革, 它要摆脱对化石燃料的依赖。1978年雷克雅未克大学教授柏拉基阿拉松就指出到2030~2040年间, 冰岛可能会成为“氢动力”社会, 完全不使用化石燃料, 转而依靠清洁的氢能源。

冰岛的自然资源非常丰富, 岛上居民供暖来自地热, 电力也来自地热和水力发电。但冰岛人石油消费量很大, 他们打算用氢作为可再生能源。1999年, 诞生了《“冰岛新能源”协会》, 该协会工作人员拉森介绍: 最初的十年是技术实证阶段, 如果得出的经验是积极的, 我们将在车船上采用氢能源。

专家的预言和协会工作的结果招来了投资, 戴姆勒——克莱斯勒公司挪威水疗院和壳牌公司都参与了氢动力研发工作。迈向未来的一步是在冰岛首都雷克雅未克建设全球首家公用“氢加油站”, 借用地热和水力发电的电力将水分解出氢, 再通过压缩机压入巨大的储存容器中。当汽车来“加油”时, 氢经管道无声地灌入汽车的压力瓶中, 汽车是靠燃料电池产生的电流来驱动发动机。今年已有3辆燃料电池的公交车在市内行驶。

科学家们希望把这项新技术在欧洲9个城市试验和推广。该公司发言人克勒认为, 这项技术在冰岛推广只需10~30年, 但在欧洲其它地方则需要20年、30年甚至40年。

广泛使用氢动力不仅可将“温室效应气体”减少排放, 还能促使冰岛经济的增长。冰岛政府还计划到2015年开始将捕鱼的动力系统也换成燃料电池, 希望到2040年能拒化石燃料于国门之外。

目前仍有许多问题要解决。例如, 1辆安装这种燃料电池的大客车的造价要比1辆柴油大客车高出6倍, 且氢的费用目前要比汽油和柴油高许多, 还有待在这些方面有重大改革。

(赵旺初 供稿)

occupies a middle position between the above-cited two elements, resulting in a volatility expressed as $As > Cd > Cr$. Tests have proved that with a rise in temperature the volatility of these elements also gradually increase, and $As \gg Cd > Cr$. **Key words:** trace element; release; As; Cd; Cr

高温低氧燃烧过程中 NO_x 排放规律研究 = **A Study of NO_x Emission Mechanism during a High-temperature and Low-oxygen Combustion Process** [刊, 汉] / ZHONG Shui-ku, MA Xian-guo (Power Engineering Institute under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), ZHAO Wu-fei, SHUI Xiang-rong (Shanghai No. 711 Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200011) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 483 ~ 486

An experimental investigation was conducted of the NO_x emission mechanism during the process of high-temperature and low-oxygen combustion. The NO_x emission mechanism was identified under various air-preheating temperatures and different oxygen-contents of preheated air. Meanwhile, CFD (computational fluid dynamics) general software has been employed to perform a numerical calculation of the NO_x emission concentration during the high-temperature and low-oxygen combustion process, resulting in the acquisition of some general law-conforming relationships. **Key words:** high-temperature air combustion, NO_x emission, experimental investigation, numerical calculation

木屑在固定床焚烧中 HCl 的控制研究 = **Research on the Control of HCl during the Incineration of Sawdust in a Fixed Bed** [刊, 汉] / JIANG Xu-guang, LI Xiang-pai, CHI Yong, et al (Education Ministry Key Laboratory on Energy Clean Utilization and Environmental Engineering under the Thermal Energy Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5) — 487 ~ 490

Through tube-furnace tests the dechlorination effectiveness of various dechlorinating agents was investigated. By comparing the dechlorination results of the one and the same dechlorinating agent under various operating conditions the optimum dechlorination conditions were determined. The results of tests indicate that the dechlorination efficiency of calcium-based absorbents is higher than that of magnesium-based absorbents. The optimum dechlorination conditions of CaO can be given as follows: combustion temperature 500 - 600 °C, residence time 5 - 15 min. At a high temperature section the dechlorination efficiency of CaO is reduced drastically due to the high-temperature hydrolysis of dechlorination product $CaCl_2$. **Key words:** HCl, sawdust, combustion, CaO, absorbent, combustion dechlorination, pollution control

基于模糊方法的垃圾焚烧炉燃烧控制系统 = **Combustion Control System of a Fuzzy Logic-based Municipal Solid Waste (MSW) Incinerator** [刊, 汉] / SHEN Kai, LU Ji-dong, LIU Gang, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 491 ~ 494

As an item of mature technology for refuse waste-heat utilization refuse incineration systems have found increasing applications in China. The combustion process control of a refuse incinerator constitutes the basis for the stable operation of such incinerators. The authors have conducted a study of the refuse incineration process by making use of a fuzzy method-based control strategy. The fuzzy control algorithm of refuse incineration is briefly described and compared with conventional PID (proportional, integral and differential) control algorithm. The continuous operation of a specific unit based on the recommended algorithm has been realized with a relatively high effectiveness. **Key words:** refuse incineration, fuzzy control, incinerator, fuzzy method

改变进气流量实现可调回流区位置的研究 = **A Study of the Realization of an Adjustable Recirculation-zone Location through the Change of Inlet Airflow Rates** [刊, 汉] / FU Wei-biao, GONG Jing-song (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal En-